

Даша. Совет

А.Е.СЛУХОЦКИЙ

# ИНДУКТОРЫ

БИБЛИОТЕЧКА ВЫСОКОЧАСТОТНИКА-ТЕРМИСТА



Библиотечка высокочастотника-термиста  
(четвертое издание)

Перечень выпусков

Выпуск 1

Глуханов Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева.

Выпуск 2

Демичев А. Д. Поверхностная закалка индукционным способом.

Выпуск 3

Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева.

Выпуск 4

Слухоцкий А. Е. Индукторы.

Выпуск 5

Гуревич С. Г., Моргун В. В. Источники питания средней частоты установок индукционного нагрева.

Выпуск 6

Васильев А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева

Выпуск 7

Иваинов В. Н., Луини И. В., Кулжинский В. Л. Высокочастотная сварка металлов.

Выпуск 8

Рыскин С. Е. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности.

Выпуск 9

Вологдин В. В., Кущ Э. В. Индукционная пайка.

Выпуск 10

Кияжевская Г. С., Фирсова М. Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов.

Выпуск 11

Федорова И. Г., Безменов Ф. В. Высокочастотная сварка пластмасс.

Выпуск 12

Бындиг В. М., Добровольская В. И., Ратников Д. Г. Индукционный нагрев при производстве особо чистых материалов.

Выпуск 13

Дашкевич И. П. Высокочастотные разряды в электротермии.

Выпуск 14

Фогель А. А. Индукционный метод удержания металлов во взвешенном состоянии.

Выпуск 15

Немков В. С., Полеводов Б. С. Математическое моделирование на ЭВМ устройств высокочастотного нагрева.

# **БИБЛИОТЕЧКА ВЫСОКОЧАСТОТНИКА - ТЕРМИСТА**

---

Издание 4-е, переработанное и дополненное

А. Е. СЛУХОЦКИЙ

## **ИНДУКТОРЫ**

Выпуск 4

*Под редакцией  
канд. техн. наук А. Н. Шамова*



Ленинград «Машиностроение»  
Ленинградское отделение  
1979

ББК 34.651

С49

УДК 621.365

Слухоцкий А. Е.

С49 Индукторы. 4-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. — 72 с., ил. (Б-чка высокочастотника-термиста).

25 к.

В брошюре рассмотрены общие принципы конструирования индукторов, выбор их основных размеров, общие принципы и теория работы индукторов, роль магнитопровода. Значительное место в ней отведено тепловому и электрическому расчету цилиндрических и плоских индукторов, а также расчету нагревателей для сквозного нагрева.

В четвертом издании (3-е изд. 1965 г.) приведены новые сведения о закалке тел сложной формы, особенно тел вращения, а также описание соответствующих конструкций индукторов и их приближенный расчет. Все примеры расчетов переработаны в соответствии с результатами последних исследований.

Брошюра рассчитана на технологов и конструкторов, занимающихся эксплуатацией и проектированием электротермических установок.

С 31103—128  
038(01)—79 128—79 2704070000

ББК 34.651  
6П4.5!

ИБ № 2055

АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ СЛУХОЦКИЙ

ИНДУКТОРЫ

(Библиотечка высокочастотника-термиста, выпуск 4)

Редактор издательства Н. З. Симоновский  
Художественный редактор С. С. Венедиктов  
Технический редактор Т. Н. Витошинская  
Корректор И. Г. Жукова  
Обложка художника Н. И. Абрамова

Сдано в набор 07.09.78. Подписано в печать 07.06.79. М-26307. Формат 84×108/32.  
Бумага типографская № 2. Гарнитура литературия. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 3,78. Уч.-изд. л. 4,46. Тираж 15000 экз. Зак. № 1265. Цена 25 коп.  
Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2 имени  
Евгении Соколовой «Союзполиграфпрома» при Государственном комите-  
те СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 198052.  
Ленинград, Л-52, Измайловский проспект. 29

© Издательство «Машиностроение», 1979 г.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Широкое применение в Советском Союзе индукционного нагрева для различных видов термообработки изделий требует простых методов проектирования специальной высокочастотной аппаратуры. К такой аппаратуре прежде всего относятся индукторы, служащие для концентрирования переменного электромагнитного поля в нагреваемых областях.

Для проектирования и выбора остальной высокочастотной аппаратуры, например трансформаторов и конденсаторов, необходимо знать основные параметры индуктора: ток, напряжение и коэффициент мощности. Точный расчет этих величин при нагреве стальных деталей осложняется зависимостью удельного сопротивления и особенно магнитной проницаемости стали от температуры. Однако в установках для поверхностной закалки обычно достаточно определить средние (за время нагрева) параметры индуктора. В этом случае расчетные данные индукторов легко могут быть обобщены в виде графиков, что и осуществлено в брошюре.

Приведены также методы приближенного расчета основных типов индукторов для сквозного нагрева, работающих в различных режимах.

Индукционный нагрев применяется для многих других целей. Однако в большинстве случаев это отражается лишь на второстепенных деталях конструкции индукторов. Например, индуктор для стыковой сварки труб отличается от индуктора для поверхностной закалки отсутствием душевого устройства и большим зазором между поверхностью индуктирующего провода и нагреваемой поверхностью. Поэтому будут рассмотрены лишь наиболее характерные виды индукторов, их расчет и некоторые индукторы специального назначения.

Предлагаемые методы ориентировочного расчета индукторов проверены на практике Всесоюзным научно-исследовательским институтом токов высокой частоты им. В. П. Вологдина.

# I. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ВНЕШНИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Индукционный нагрев металлических изделий осуществляется с помощью специального устройства, называемого индуктором. Простейшим видом индуктора является кольцевой виток, согнутый из медной шины или трубы. При пропускании переменного тока через индуктор вокруг его провода возникает магнитное поле, напряженность которого периодически изменяется во времени по величине и направлению. Напряженность магнитного поля, а следовательно, и плотность магнитного потока — индукция будет наибольшей внутри витка индуктора вблизи провода.

Если поместить внутрь индуктора металлический цилиндр, то переменный магнитный поток, пронизывающий этот цилиндр, вызовет появление в нем индуцированного тока. Индуцированный ток вследствие эффекта близости будет сконцентрирован под проводом индуктора и путь его будет иметь кольцевую форму. Чем выше частота тока, тем в более тонком слое протекает ток в цилиндре, т. е. тем сильнее проявляется поверхностный эффект<sup>1</sup>. Ток, индуцированный в поверхностных слоях цилиндра, вызывает его нагрев, причем температура поверхности и глубина нагрева зависят от подводимой к индуктору мощности, частоты и времени нагрева. С другой стороны, ширина полосы нагрева, ее форма и равномерность нагрева поверхности зависят от формы индуктора.

Таким образом, с помощью индуктора электромагнитная энергия, а следовательно, и выделение теплоты концентрируются в заданной области. Индуцированный ток сосредоточивается в полосе, ширина которого близка к ширине индуктора. Соответственно этому и ширина нагретой полосы также мало отличается от ширины индуктора.

Поверхностный нагрев металла индуцированными токами высокой частоты используется для поверхностной закалки стальных деталей. В практике встречаются детали самой разнообразной, часто очень сложной формы. Соответственно этому могут усложняться и индукторы. Однако существуют общие основные принципы, которыми необходимо руководствоваться при конструировании индукторов.

Из большого разнообразия закалочных индукторов будут рассмотрены только основные их типы:

1) индукторы для нагрева внешних цилиндрических поверхностей;

<sup>1</sup> См. Библиотечку, вып. 1.

- 2) индукторы для нагрева внутренних цилиндрических поверхностей;
- 3) индукторы для нагрева плоских поверхностей;
- 4) основные типы индукторов для нагрева поверхностей сложной формы.

Естественно, что в практике поверхности закалки может встретиться ряд случаев, не нашедших конкретного рассмотрения в настоящей брошюре. Однако даже самые сложные индукторы представляют всегда ту или иную комбинацию перечисленных выше типов.

Любой индуктор состоит из следующих основных частей: 1) индуктирующего провода, создающего магнитное поле, необходимое для индуктирования тока в нагреваемой детали; 2) токоподводящих шин; 3) колодок, служащих для соединения индуктора с понижающим трансформатором; 4) устройства для подачи воды, охлаждающей индуктор и нагреваемую деталь с целью ее закалки (на рис. 1 на внутренней стороне индуктирующего провода видны отверстия, через которые из закалываемую деталь поступает закалочная вода).

Основной частью индуктора является индуктирующий провод, конструкция которого в значительной степени определяет результат закалки. Остальные части носят вспомогательный характер, и их конструирование обычно затруднений не вызывает.

Все перечисленные выше типы индукторов можно разбить на две группы: 1) индукторы для закалки на средних частотах; 2) индукторы для закалки на радиочастотах. Принципиального различия между этими двумя группами нет. Однако часто наблюдается разница в конструкции, объясняющая тем, что при радиочастотах работа индуктора протекает при меньших удельных мощностях и, что особенно существенно, при меньших токах, так как активное сопротивление нагреваемого объекта возрастает с увеличением частоты. При равной мощности напряжение на индукторе в этом случае значительно выше, чем при работе на средних частотах. В связи с этим индукторы второй группы, как правило, выполняются менее массивными. Они могут быть менее массивными, чем индукторы первой группы, также и потому, что при радиочастотах вследствие уменьшения токов резко ослабляются электродинамические взаимодействия между всеми токоведущими частями. Это особенно существенно для разъемных индукторов, так как возникающие под влиянием протекающего в индукторе тока усилия стремятся их разомкнуть.

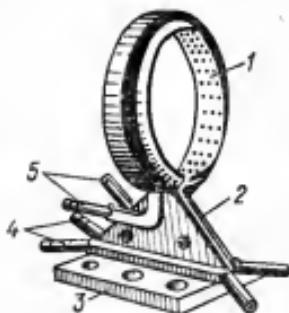


Рис. 1. Индуктор для закалки способом одновременного нагрева цилиндрической детали:

1—индуктирующий провод, создающий переменное магнитное поле; 2—токоподводящие шины; 3—колодки для присоединения индуктора к понижающему трансформатору; 4—трубки для подачи воды, охлаждающей соединительные колодки; 5—трубки для подачи воды, охлаждающей индуктор и нагретую поверхность детали

Индукторы первой и второй группы различаются конструкцией токоведущих шин и соединительных колодок, что определяется различием конструкции выводов понижающих трансформаторов, используемых при средних и радиочастотах. Следует отметить, что это различие носит в значительной мере случайный характер.

При средних частотах у понижающих трансформаторов принята конструкция колодок вторичной обмотки в виде медных массивных брусков, в контактные поверхности которых ввернуты латунные шпильки диаметром 10—12 мм. Колодки индукторов делаются массивными толщиной 8—12 мм и снабжаются отверстиями для пропуска указанных шпилек, служащих для крепления индукторов. Подобными же, но менее массивными колодками яндуктор присоединяется к выводам понижающего трансформатора при радиочастотах.

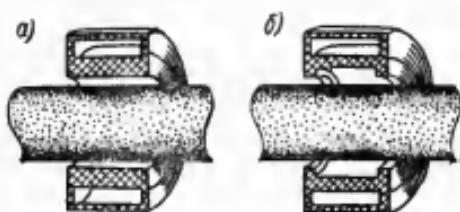


Рис. 2. Характер нагрева детали узким индуктором: а — индуктор нормальной конструкции; б — индуктор с выточкой для выравнивания толщины нагретого слоя

Индукторы, предназначенные для закалки на средних частотах, в случае необходимости могут быть легко применены и при радиочастотах, если изготовить к ним соответствующие переходные колодки, подходящие к выводам понижающего трансформатора.

Кроме указанных, существуют еще некоторые другие различия в выполнении индукторов для работы на средних и радиочастотах. Более подробно рассмотрим особенности индукторов для каждой группы отдельно.

Существенным моментом при конструировании индуктора является выбор ширины индуктирующего провода и зазора между его внутренней рабочей поверхностью и поверхностью нагреваемого изделия. Ширина индуктирующего провода при одновременном способе нагрева определяется требуемой шириной закаленного слоя. Здесь может быть два случая: 1) закаливается некоторый участок на поверхности длинной детали; 2) закаливается вся боковая поверхность детали.

В первом случае ширина закаленной полосы определяется распределением индуцированного тока на поверхности детали и теплопередачей в осевом направлении. Обычно индукторы для одновременного нагрева имеют относительно большую ширину, в несколько раз превосходящую зазор между поверхностью детали и индуктирующим проводом. В этих условиях индуцированный ток сосредоточен в полосе, ширина которой близка к ширине индуктора. Обычно ширина закаленной полосы оказывается на 10—20% меньше ширины, чем и следует руководствоваться при выборе ширины индуктирующего провода.

Если ширина индуктора меньше десяти зазоров, то закаленный слой в продольном разрезе приобретает серповидную форму (рис. 2). Чтобы избежать этого, зазор следует делать неравномер-

ным — большим в средней части, малым по краям, что достигается при кольцевой выточке глубиной 2—3 мм в средней части индуктора.

При многовитковом индукторе можно у краев уменьшить шаг витков, что вызовет повышение напряженности поля и увеличение плотности индуктированного тока под краями индуктора. Закаленный слой в этом случае становится ровнее. Если ширина индуктирующего провода больше десятикратного зазора, то достаточно ровный закаленный слой получается и при неизменном зазоре.

Когда деталь калится по всей длине, то ширина индуктирующего провода должна быть равна длине детали. При этом вся боковая поверхность нагревается равномерно, без заметного перегрева, и закаленный слой имеет почти неизменную глубину.

При непрерывно-последовательном способе нагрева деталей относительно большой длины ширина индуктирующего провода определяется или мощностью генератора, или заданной производительностью. Время нагрева каждого элемента поверхности детали, проходящего под индуктирующим проводом, тем больше, чем больше ширина привода и меньше скорость движения детали относительно индуктора. Поэтому можно ввести понятие о времени нагрева элемента поверхности, аналогичное понятию времени нагрева при одновременном способе нагрева,

$$t'_k = a/v, \quad (1)$$

где  $t'_k$  — время нагрева элемента поверхности, с;  $a$  — ширина индуктирующего провода, см;  $v$  — скорость движения, см/с.

Удельная мощность рассчитывается на поверхность детали, охватываемую индуктором,

$$p_0 = P_T / (\pi D_2 a), \quad (2)$$

где  $P_T$  — полная мощность на поверхности детали, кВт;  $D_2$  — диаметр детали, см.

При заданной мощности генератора получим следующее соотношение для определения максимальной ширины индуктирующего провода:

$$a = P_T / (\pi D_2 p_0)$$

или, выражая мощность в детали через мощность генератора,

$$a = \eta_k \eta_{tr} P_r / (\pi D_2 p_0), \quad (3)$$

где  $P_r$  — мощность генератора, кВт;  $\eta_k$  — к. п. д. индуктора;  $\eta_{tr}$  — к. п. д. понижающего закалочного трансформатора.

В среднем можно принять  $\eta_k \approx \eta_{tr} \approx 0,8$ . Тогда ширина индуктора будет

$$a = 0,64 P_r / (\pi D_2 p_0) \text{ см},$$

или

$$a \approx 0,2 P_r / (D_2 p_0) \text{ см}. \quad (4)$$

Ориентировочные значения времени нагрева и удельных мощностей в зависимости от глубины закаленного слоя, диаметра и частоты можно определить из соответствующих графиков (см. рис. 8—10).

Следует иметь в виду, что скорость передвижения детали относительно индуктора не должна быть меньше определенной. В противном случае качество закаленного слоя будет ухудшаться, так как промежуток времени между концом нагрева и началом охлаждения будет слишком велик и произойдет частичный распад аустенита. Это особенно характерно для углеродистых сталей, для которых не следует применять скорости менее 0,5 мм/с.

Если задана производительность, то тем самым определена и скорость движения. Так как при заданной глубине закаленного слоя время нагрева является величиной известной, то ширину индуктора можно определить по формуле

$$a = vt_k' \quad (5)$$

В этом случае требуемая мощность генератора на основании формулы (4) равна

$$P_F \approx 5aD_2p_0 \text{ кВт.} \quad (6)$$

## 2. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ НА СРЕДНИХ ЧАСТОТАХ

Индукторы для закалки способом одновременного нагрева. Длительность нагрева детали составляет обычно единицы секунд. Поэтому часто представляется возможным изготавливать индукторы без охлаждения индуктирующего провода в процессе нагрева. Чтобы избежать перегрева и расплавления индуктирующего провода, его выполняют массивным. Однако увеличение толщины индуктирующего провода не приводит к уменьшению электрического сопротивления и снижению потерь, так как глубина проникновения тока при частотах выше 2500 Гц составляет меньше 1,5 мм. Основная ненагруженная электрическим током масса металла служит только для отвода теплоты, выделяющейся в «активном слое», толщина которого примерно равна глубине проникновения тока. Вследствие кольцевого эффекта и эффекта близости, действующих согласно в случае нагрева внешних поверхностей цилиндрических деталей, активный слой расположен со стороны внутренней поверхности индуктора.

Расчеты и опыт показывают, что для обеспечения надлежащего теплоотвода толщина индуктирующего провода должна быть в несколько раз больше требуемой глубины закаленного слоя

$$d_1 \approx (2,5 \dots 4) x_k, \quad (7)$$

где  $d_1$  — толщина внутренней стенки индуктирующего провода;  $x_k$  — глубина закаленного слоя.

Нижний предел в формуле (7) выбирается при глубине закалки больше 5 мм, верхний — при меньших глубинах.

Чаще всего вода для закалки подается через отверстия в активной части индуктора. Для этого в индуктирующем проводе в стенке, обращенной к нагреваемой поверхности, просверливают ряд отверстий диаметром 1,5—2 мм, располагая их в шахматном порядке на расстояниях между центрами 7—12 мм. Воду подают через камеру, припаянную к внешней стороне индуктирующего

проводка. Эта же вода охлаждает и сам индуктор, подготовляя его к следующему циклу нагрева.

Все ответственные части индукторов, особенно токоведущие, спаивают между собой тугоплавкими припоями. Наиболее распространена пайка латунью и серебряными припоями. Применять олово не рекомендуется вследствие низкой температуры его плавления, низкой механической прочности спая и большого переходного электрического сопротивления, что особенно необходимо учитывать при пайке токоведущих частей. Когда закалка производится без вращения детали, то в месте попадания струй охлаждающей воды на поверхность обнаруживаются микротрещины. В процессе чистового шлифования эти трещины удаляются. Однако в некоторых случаях желательно обойтись без чистового шлифования, тогда наличие трещин недопустимо. Избежать трещин можно распылением струй воды так, чтобы она равномерно охлаждала всю поверхность. Трещин можно также избежать, если придать отверстиям для закалочной воды коническую или, что проще, ступенчатую форму таким образом, чтобы струи, падая на охлаждаемую поверхность расходящимися пучками, перекрывали друг друга. В этом случае диаметр отверстия у выхода составляет 3—3,5 мм.

Недостатком этого способа является уменьшение активного сечения индуктирующего провода, что приводит к увеличению сопротивления.

Вода на поверхность нагретой детали должна подаваться равномерно под большим давлением. Поэтому следует высоту водяной камеры в свету выбирать так, чтобы ее внутреннее сечение не было меньше суммарной площади отверстий. Ввод воды в камеру осуществляется в 2—3 местах расширяющимися патрубками, причем суммарное сечение подводящих трубок должно быть в два-три раза больше суммарной площади отверстий для выпуска воды на закаливаемую поверхность.

Подвод тока к индуктору осуществляется шинами, выполняемыми из листовой меди толщиной 2—3 мм. Шины имеют форму трапеции. Ширина шин у колодок, служащих для присоединения к закалочному трансформатору, равна высоте выводов его вторичной обмотки, которая составляет 100—200 мм, чаще всего 185 мм. Расстояние между шинами равно 2—3 мм. Увеличивать его не следует, так как при этом возрастет индуктивность шин. Длина подводящих шин, называемых иногда щеками, выбирается с учетом выполняемой конструкции, но должна быть по возможности минимальной. Шины обычно имеют постоянное водяное охлаждение, для чего к ним припаивают трубы, по которым пропускают воду. Трубы располагают так, чтобы охлаждение всей шины было наиболее равномерным. Например, не следует располагать трубы по краю шины, так как при этом будет плохо охлаждаться середина.

Для придания индуктору прочности шины стягивают латунными болтами, головки которых следует припаять к шине. Болты изолируют от другой шины втулками и шайбами из мikanита или текстолита. В качестве изоляции между шинами помещают мikanитовую прокладку. Шины припаивают к колодкам, служащим для присоединения к трансформатору.

Во многих случаях деталь, у которой закалке подвергаются отдельные участки, в целом имеет сложную форму, например, коленчатый вал автомобильного двигателя. При этом индуктор приходится делать разъемным, с тем чтобы его можно было надеть на шейку вала.

Простейшие разъемные индукторы изготавливают, так же как и неразъемные, из достаточно толстой шины, на которую напанывают камеру для воды. При этом в некоторых индукторах особенно у стакнов-автоматов одна половина делается съемной в виде полукольца; другая половина состоит из двух частей, присоединяющихся к трансформатору. Для соединения обеих половинок индуктора служат массивные контактные пластины. Прижим при неавтоматизированной ручной закалке осуществляется или с помощью латунной скобы с на jakiным винтом, или посредством рычагов, что более удобно (рис. 3).

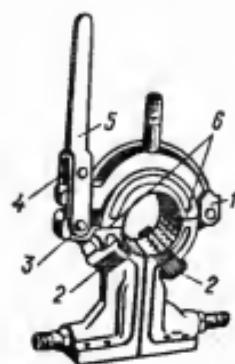


Рис. 3. Разъемный индуктор для закалки способом одновременного нагрева с рычажным зажимом и магнитной цепью для выравнивания нагрева детали в местах токоподводов:

1 — ось шарнира верхней половины индуктора, изолированная от нижней половины;  
2 — магнитопроводы;  
3 — ось рычага, изолированная от индуктора текстолитовой втулкой;  
4 — на jakiный ролик;  
5 — на jakiный рычаг;  
6 — контактные плоскости

Чтобы облегчить установку замыкающей половины индуктора в нижнем положении на контактных плоскостях индуктора устанавливают направляющие шпильки, которые входят в соответствующие отверстия. Контактные плоскости могут не занимать всей поверхности разъема. Осуществление контакта по всей плоскости весьма затруднительно и не приносит большой пользы, так как вследствие поверхности эффекта ток проходит лишь вблизи внутренней поверхности индуктора. В то же время при большой площади контакта общее усилие при зажиме, определяемое требуемым давлением, будет велико, поэтому практически выгоднее обеспечить надежный контакт в узкой полоске, но обязательно по всей ширине индуктора (рис. 4). Очень плохо, если нарушение контакта наблюдается у края. Тогда ток проходит только по части ширины индуктора. Вследствие эффекта близости полоса нагрева окажется также суженной. Ее форма примерно будет повторять форму части индуктирующего провода, по которой идет ток.

Лучше всего контактную поверхность в индукторе осуществлять в виде выступа на замыкающей съемной половине. Ширина выступа должна составлять 6—8 мм, высота — 0,5—1 мм, и он должен отстоять от внутренней поверхности индуктора на 8—12 мм. В этом случае неравномерности в распределении тока по ширине индуктирующего провода будут несколько сглаживаться при прохождении его по стекам щели перед контактом, так как главная часть неравномерности придется на вертикальные стенки узкой щели. На цилиндрической внутренней поверхности индуктора ток будет распределен почти равномерно по всей ширине

проводами. Так как в процессе работы медные контакты окисляются, их принято серебрить или осуществлять в виде приварных серебряных пластинок.

Более сложные разъемные индукторы для работы в станках-автоматах делаются массивными. Движение отъемной части осуществляется с помощью гидравлического или пневматического привода. Когда деталь снимается, верхняя половина индуктора поднимается вместе с головкой станка. Части индуктора изготавливаются из целых медных поковок, в которых фрезеруются камеры для закалочной воды.

При закалке детали без вращения часто наблюдается уменьшение ширины закаленной полосы против токоподводов к индуктору.

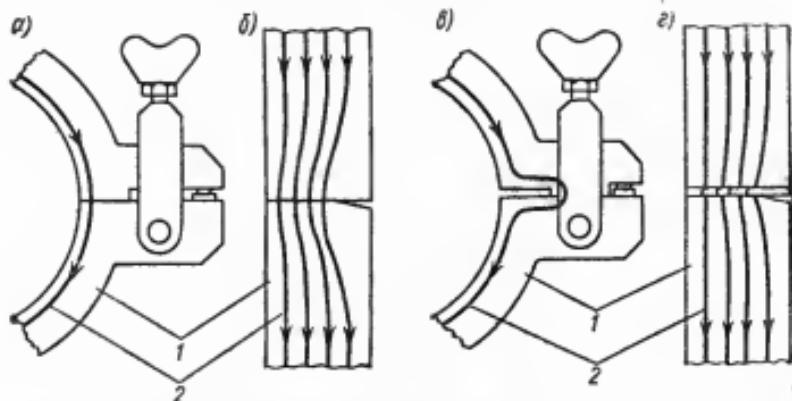


Рис. 4. Конструкция контактов индуктора: *а* — контактная часть с контактом у внутренней поверхности индуктора; *б* — путь тока при местном плохом контакте; *в* и *г* — то же при контакте, удаленном от внутренней стороны:

*1* — индуктирующий провод; *2* — путь тока

тирующему проводу. Это объясняется тем, что ток, стремясь идти по кратчайшему пути, выходит на боковые поверхности индуктирующего провода, срезая углы, и лишь постепенно переходит на внутреннюю поверхность. Около токоподводов эффективный зазор оказывается большим, и индуктированный ток в нагреваемой детали распределяется в широкой зоне с малой плотностью. Достаточная для закалки температура нагрева обеспечивается лишь под серединой индуктора в узкой зоне.

Это явление устраняется применением магнитопроводов из листовой электротехнической стали или феррита, устанавливаемых около токоподводов. Ток в индуктирующем проводе вытесняется к его открытой стороне, в данном случае на внутреннюю рабочую поверхность, что приводит к уменьшению эффективного зазора. Распределение плотности индуктированного в нагреваемой детали тока против токоподводов становится примерно таким же, как и под другими частями индуктора, и нагрев поверхности выравнивается (рис. 5).

С помощью магнитопроводов можно несколько повысить концентрацию индуктированного тока, а следовательно, и нагрев по-

верхности детали в отдельных местах. Такой способ используют, например, для выравнивания ширины закаленной полосы на шейках коленчатого вала, иногда сужающейся вследствие местного повышенного отвода тепла массивными щеками. Выравнивание ширины закаленной полосы достигается подбором толщины пакетов, составляющих магнитопровод, а также изменением зазора между магнитопроводом и деталью.

Иногда на массивном индуктирующем проводе около токоподводов делают прорези, так что с его внутренней стороны остается перемычка толщиной 2—3 мм. При этом прерывается путь

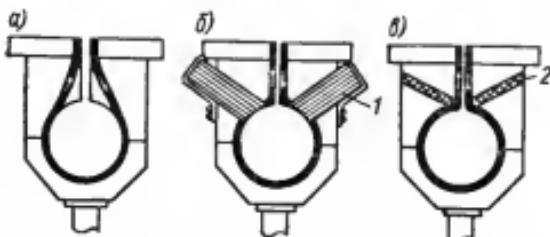


Рис. 5. Распределение тока в массивных индукторах; *а* — ток, идя по пути наименьшего сопротивления, выходит на боковую поверхность индуктора, минуя углы; *б* — магнитопроводы вытесняют ток на внутреннюю поверхность индуктора; *в* — прорези, преграждая путь току, заставляют идти его по внутренней поверхности индуктора:

*1* — магнитопровод, способствующий вытеснению тока на внутреннюю поверхность индуктора; *2* — изолирующие пластины, вставленные в прорези для придачи индуктору механической прочности

тока по боковой поверхности и ток принудительно вытесняется на внутреннюю часть индуктирующего провода. Однако этот способ хуже и обладает меньшей гибкостью, чем описанный выше. Его целесообразно применять в некоторых случаях при радиочастотах.

При закалке шеек коленчатых валов нежелателен нагрев их щек, так как он приводит к повышенному короблению и повышенной затрате энергии. В этом случае с краев индуктирующего провода по окружности снимаются фаски под углом 30—40°, и основная часть боковой поверхности индуктирующего провода удаляется от щек, в результате чего нагрев щек оказывается незначительным.

**Индукторы для закалки непрерывно-последовательным способом.** Индуктирующий провод обычно изготавливается из медной трубки прямоугольного сечения, непрерывно охлаждаемой водой. Толщина стенки трубы выбирается в зависимости от глубины проникновения тока в медь. Указанная глубина приближенно равна

$$\Delta_1 \approx 7/\sqrt{\Gamma} \text{ см.} \quad (8)$$

Оптимальная толщина стенки трубы, при которой активное сопротивление индуктирующего провода наименьшее, выражается соотношением<sup>1</sup>

$$d_1 \approx 1,57\Delta_1 \approx 11/\sqrt{f} \text{ см}, \quad (9)$$

где  $d_1$  — толщина стенки трубы, см;  $\Delta_1$  — глубина проникновения тока в медь, см;  $f$  — частота тока, Гц.

При частоте 2500 Гц имеем  $d_1 = 2,2$  мм; при частоте 8000 Гц  $d_1 = 1,22$  мм. В первом случае можно использовать трубку с толщиной стенки 2 мм, во втором — с толщиной стенки 1—1,5 мм.

Вода, охлаждающая индуктор, часто одновременно служит и для закалки. В последнем случае она подается с обоих концов индуктирующего провода, а при большом его диаметре — также с помощью дополнительных вводов с раструбами, устанавливаемых в нескольких местах по окружности, и выпускается на нагретую поверхность через отверстия, просверленные в задней (по отношению к движению) кромке и индуктирующего провода. Отверстия имеют диаметр 1,2—1,5 мм, шаг — 4—5 мм и сверлятся таким образом, чтобы угол падения воды на поверхность детали составлял 25—45°. Когда необходимо в широких пределах регулировать давление воды (в дальнейшем будем называть ее закалочной), индуктор делают из двух спаянных боковыми поверхностями трубок (рис. 6). Вода, пропускаемая через переднюю трубку, служит при этом только для охлаждения индуктора. Задняя трубка устроена с отверстиями для выхода закалочной воды, как указано выше.

В отдельных случаях, когда в течение некоторого времени после включения тока закалочная вода не должна подаваться на деталь, а индуктор должен иметь малую ширину, обе трубы располагаются одна над другой. Чаще всего такие индукторы применяются для закалки деталей, имеющих с одного конца фланцы или буртики. Так как закалочная вода может отражаться от фланца и попадать под индуктор, в этих случаях применяют для удаления подливающейся воды воздушное дутье. Сжатый воздух подается через отверстие или щель в кольце, расположенному перед индуктором. Кольцо имеет поперечный разрез, так как иначе оно будет представлять замкнутый контур, в котором будет индуцироваться ток. Иногда ставят два полукольца.

В некоторых случаях закалочную воду подают из отдельного душевого кольца, находящегося за индуктором, однако удобнее использовать для этой цели сам индуктор. Это кольцо также должно иметь разрез.



Рис. 6. Индуктор для закалки непрерывно-последовательным способом:  
1 — трубы для воды, охлаждающей индуктор;  
2 — трубы с отверстиями для выпуска закалочной воды

<sup>1</sup> См. Библиотечку, вып. I.

Токоподводящие шины применяют такие же, как в индукторах, используемых при закалке способом одновременного нагрева.

### 3. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ НА РАДИОЧАСТОТАХ

При радиочастотах используют меньшие токи, чем при средних; это позволяет применить более легкие конструкции. Так как глубина проникновения тока в медь при радиочастотах мала, например при частоте  $4,4 \cdot 10^5$  Гц она составляет всего около 0,13 мм, то соотношение (9) не может быть использовано как не обеспечивающее необходимой механической прочности. Индуктирующий провод, в особенности при непрерывно-последовательном способе нагрева, можно изготовить из тонкой трубы с толщиной стенки 1 и даже 0,5 мм. Это облегчает изготовление многовитковых индукторов, что очень существенно, так как позволяет шире использовать промышленные ламповые генераторы, которые поставляются комплектно с выходными трансформаторами, часто рассчитанными на относительно большое выходное напряжение.

При закалке деталей малого диаметра необходимое напряжение на одновитковом индукторе оказывается значительно ниже выходного напряжения трансформатора. В этом случае даже при небольшой общей ширине индуктора возможно, выбрав тонкостенную трубку малого сечения, изготовить индуктор, имеющий несколько витков.

Такой индуктор, независимо от того, предназначен ли он для нагрева одновременным или непрерывно-последовательным способом, снабжается отдельным душевым устройством для подвода закалочной воды.

Одновитковые индукторы для одновременного нагрева осуществляются подобно выше описанным. Если необходимо изменить распределение тока в индукторе и выравнить нагрев, в нем часто используют различные прорези, так как применение магнитопроводов из электротехнической стали возможно лишь при толщине листа не более 0,05 мм, да и то в основном при кратковременном нагреве. Однако для изготовления магнитопроводов, используемых при радиочастотах, можно с успехом применять специальные ферромагнитные материалы с малыми потерями, из которых наиболее пригодными являются ферриты.

### 4. ИНДУКТОРЫ С ПРИСПОСОБЛЕНИЯМИ ДЛЯ УСТАНОВКИ ДЕТАЛЕЙ

Иногда при закалке деталей простой формы и небольших размеров целесообразно монтировать установочные приспособления на самом индукторе. При этом необходимо соблюдать следующие правила:

1) металлические детали, близко расположенные к индуктору, не должны представлять замкнутых контуров для тока; на-  
и

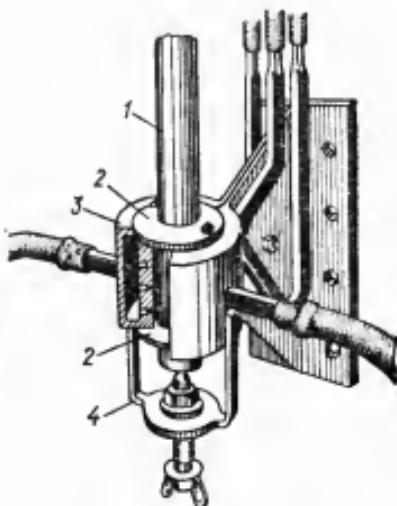
пример, все детали в виде колец должны иметь не менее одного разреза;

2) во избежание нагрева и дополнительных потерь энергии металлические детали, находящиеся в поле индуктора, следует изготавливать из немагнитных материалов;

3) крепежные детали, непосредственно соприкасающиеся с индуктором, не должны создавать дополнительных путей тока ме-

Рис. 7. Индуктор с центрирующими асбоцементными кольцами и поддерживающим деталь нижним центром из немагнитного материала:

1—нагреваемая деталь; 2—центрирующие кольца из асбоцемента; 3—индуктор; 4—скоба с подвижным центром, изолированным от индуктора



жду различными точками индуктора. Поэтому такие детали следует изолировать от индуктора.

Примером индуктора с приспособлением для установки деталей является индуктор для закалки участка на небольшой цилиндрической детали, имеющий центрирующие кольца из асбоцемента и нижний центр из немагнитного материала (рис. 7). Подобные индукторы могут быть выполнены и с приспособлением для вращения детали, например от водяной турбины.

## 5. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИНДУКТОРОВ

Расчет индуктора состоит из двух частей: теплового расчета, в результате которого определяются время нагрева детали и требуемая мощность, и электрического, в результате которого определяются мощность, подводимая к индуктору, ток в индукторе и напряжение на его зажимах. Тепловой и электрический расчеты довольно сложны, в особенности при средних частотах, где глубина активного слоя в детали, по которому проходит главная часть индуцированного тока, обычно превышает глубину прогрева до температуры магнитных превращений стали и значительное влияние на течение процесса оказывают магнитные свойства сердцевины детали. При этом магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля, а следовательно, и от мощности, подводимой к детали. Однако

представляется возможным производить приближенные расчеты для некоторых средних значений.

Тепловой расчет при радиочастотах произведен в предположении, что горячая глубина проникновения тока равна нулю.

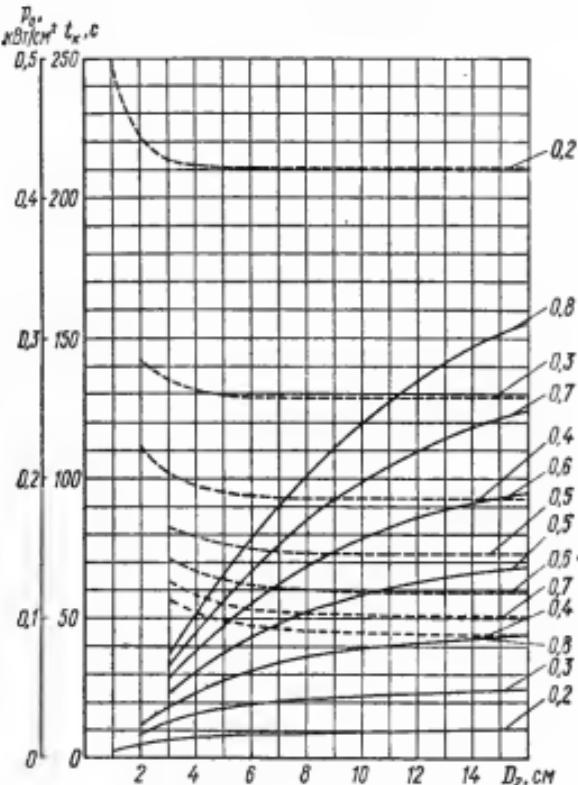


Рис. 8. Зависимость времени нагрева  $t_k$  (сплошные линии) и удельной мощности  $\rho_0$ , сообщаемой детали (штриховые линии), от диаметра  $D_2$  нагреваемого цилиндра при частоте выше 250 кГц. (Цифры на кривых указывают глубину закаленного слоя в см)

Это не внесет существенной ошибки при глубинах закаленного слоя больше 1 мм при частотах 250—440 кГц, так как прогрев на указанные и большие глубины происходит при этих частотах главным образом за счет теплопроводности.

При средних частотах (2500—10 000 Гц) в расчетах учтена глубина активного слоя. Металл считается двухслойным. Первый слой равен требуемой глубине прогрева  $x_k$  и является немагнитным. За пределами этого слоя при  $x > x_k$  сталь ферромагнитна. Средняя величина относительной магнитной проницаемости принята равной 16.

Результаты тепловых расчетов приведены на рис. 8—10 в виде графиков, на которых показаны значения времени нагрева и удельной мощности в детали для различных глубин закаленного слоя в зависимости от диаметра детали. Все расчеты сделаны для конструкционных углеродистых или слаболегированных сталей, при температуре поверхности  $T = 900^{\circ}\text{C}$ .

При других температурах поверхности значения времени на-

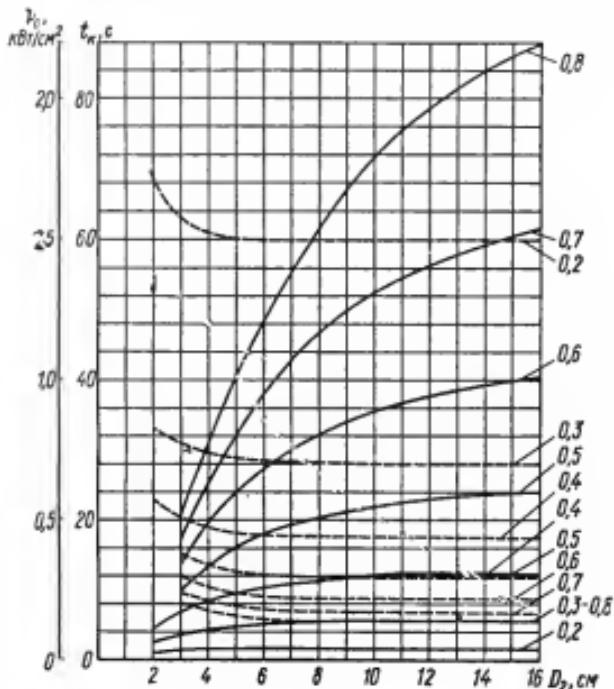


Рис. 9. Зависимость времени нагрева  $t_k$  (сплошные линии) и удельной мощности  $p_0$ , сообщаемой детали (штриховые линии), от диаметра  $D_2$  нагреваемого цилиндра при частоте тока 10 000 Гц. (Цифры на кривых указывают глубину закаленного слоя в см)

грева и удельной мощности могут сильно отличаться от приведенных на графиках рис. 8—10. В качестве известной ориентировки можно принять, что отклонение температуры поверхности на  $50^{\circ}\text{C}$  от исходного значения  $900^{\circ}\text{C}$  приводит к изменению времени нагрева примерно в 1,7 раза в обратном направлении и удельной мощности примерно в 1,5 раза в прямом направлении по отношению к величинам, найденным из графиков. Эти же графики могут быть использованы для определения времени нагрева и удельной мощности при других частотах.

Для получения времени нагрева при частоте 70 кГц, соответствующее его значение, полученное из рис. 8, следует разделить

на 1,2. Удельная мощность, наоборот, увеличивается также в 1,2 раза. Время нагрева и удельная мощность при частоте 8000 Гц с большой точностью могут быть получены из рис. 9 умножением первого на 0,9 и второго на 1,08.

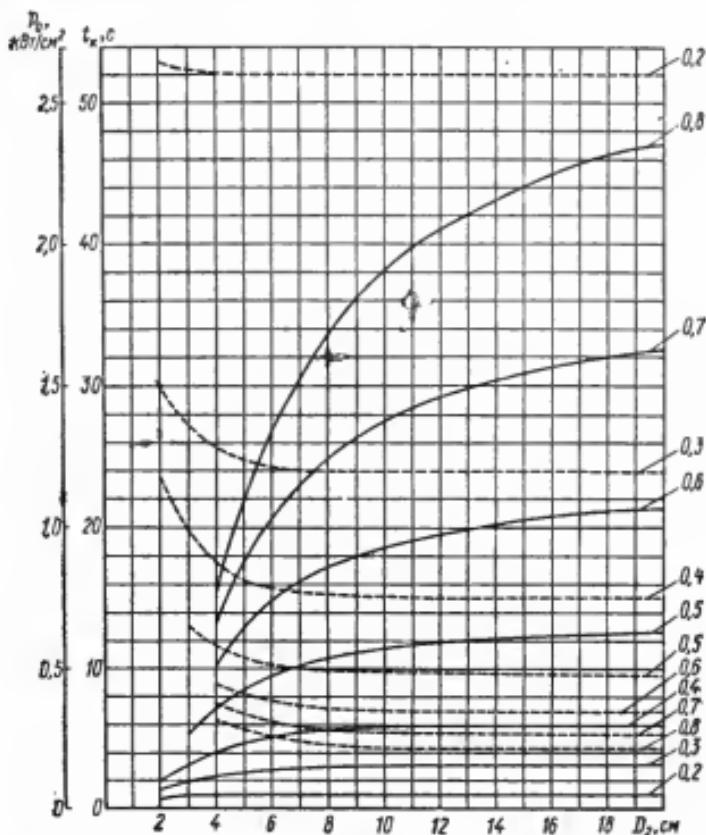


Рис. 10. Зависимость времени нагрева  $t_k$  (сплошные линии) и удельной мощности  $p_0$ , сообщаемой детали (штриховые линии), от диаметра  $D_2$  нагреваемого цилиндра при частоте тока 2500 Гц. (Цифры на кривых указывают глубину закаленного слоя в см)

В дальнейшем широкое распространение найдет частота 4000 Гц. Для получения времени нагрева и удельной мощности на этой частоте могут быть использованы графики рис. 10, относящиеся к частоте 2500 Гц, умножением времени нагрева на 1,25 и удельной мощности на 0,83.

Во всех случаях удельная мощность вычислена без учета отвода теплоты в осевом направлении, что с достаточно большой точностью справедливо при одновременном нагреве всей поверхности детали. При нагреве участка поверхности или при непре-

рывно-последовательном нагреве необходимо получить из графиков удельную мощность увеличить в 1,2 раза.

Электрический расчет проведен для частот 440 кГц, 2500 и 10 000 Гц при мощности, подводимой к индуктору, 100 кВт. При частоте 440 кГц принято, что все сечение прогрето выше точки магнитных превращений, что не вносит ощутимых ошибок при глубине закаленного слоя больше 1 мм. При частотах 2500 и 10 000 Гц в качестве средних данных принята глубина закаленного слоя, равная половине глубины проникновения тока в сталь, нагретую выше точки магнитных превращений, и относительная магнитная проницаемость сердечника, равная 16. На рис. 11—13 приведены значения тока в индукторе и напряжения на его зажимах в зависимости от диаметра индуктора при различной его ширине. Зазор между индуктором и деталью принят равным 0,3 см.

Если необходимо определить ток и напряжение при других частотах, мощностях и зазорах, можно пользоваться следующими формулами:

$$U_{n0,3} = 0,1U'_{n0,3} \sqrt{P_n} (f/f_{ba})^{1/4}; \quad (10)$$

$$I_{n0,3} = 0,1I'_{n0,3} \sqrt{P_n} (f_{ba}/f)^{1/4}, \quad (11)$$

где  $U_{n0,3}$  — напряжение на зажимах индуктора при мощности  $P_n$ , частоте  $f$  и зазоре 0,3 см;  $U'_{n0,3}$  — то же, но при мощности 100 кВт и частоте  $f_{ba}$  соответствующей рис. 11—13;  $I_{n0,3}$  — ток в индукторе при мощности  $P_n$ , частоте  $f$  и зазоре 0,3 см;  $I'_{n0,3}$  — то же, но при мощности 100 кВт и частоте  $f_{ba}$ ;  $f_{ba}$  — частота, соответствующая рис. 11—13. При пересчете токов и напряжений выбирается частота, наиболее близкая к требуемой частоте  $f$ .

В наиболее интересных для практики случаях имеем формулы пересчета:

при неизменной частоте

$$U_{n0,3} = 0,1U'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (12)$$

$$I_{n0,3} = 0,1I'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (13)$$

с частоты 440 на частоту 70 кГц,

$$U_{n0,3} = 0,0294U'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (14)$$

$$I_{n0,3} = 0,158I'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (15)$$

с частоты 10 000 на частоту 8000 Гц

$$U_{n0,3} = 0,0862U'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (16)$$

$$I_{n0,3} = 0,106I'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (17)$$

с частоты 2500 на частоту 4000 Гц

$$U_{n0,3} = 0,137U'_{n0,3} \sqrt{P_n}; \quad (18)$$

$$I_{n0,3} = 0,0868I'_{n0,3} \sqrt{P_n}. \quad (19)$$

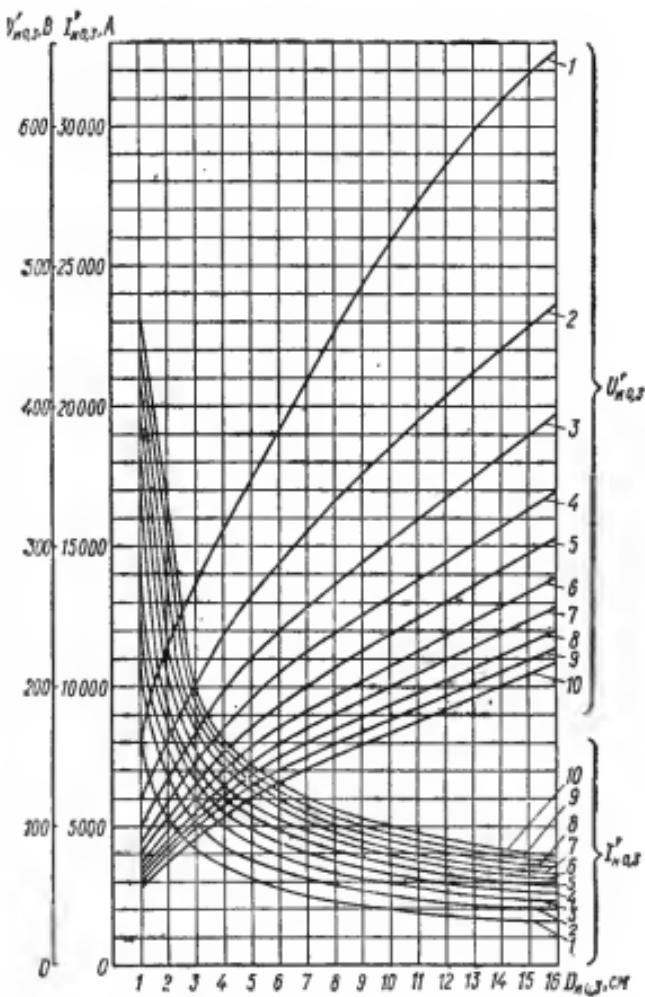


Рис. 11. Зависимость напряжения на индуктирующем проводе  $U'_{w0,3}$  и тока в индукторе  $I'_{w0,3}$  при частоте тока 440 кГц и мощности 100 кВт, подводимой к индуктору, от диаметра одновиткового индуктора  $D_{w0,3}$ . Зазор между индуктором принят равным 0,3 см. (Цифры на кривых указывают ширину индуктирующего провода в см)

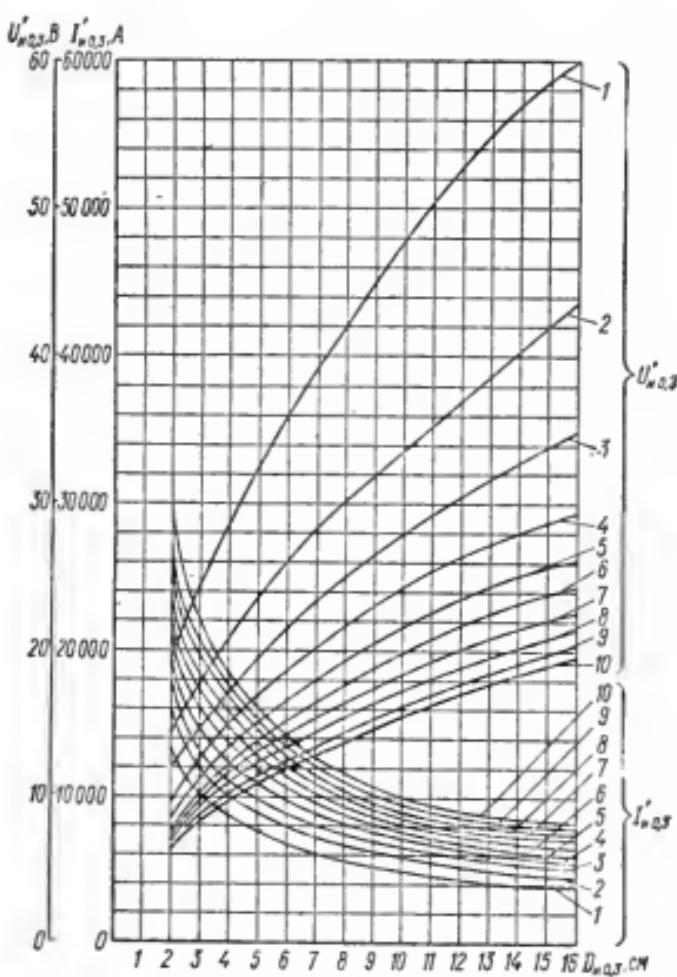


Рис. 12. Зависимость напряжения на индуктирующем проводе  $U'_{0,3}$  и тока в индукторе  $I'_{0,3}$  при частоте тока 10000 Гц и мощности 100 кВт, подводимой к индуктору, от диаметра одновиткового индуктора  $D_{0,3}$ .  
 Зазор между индуктором и нагреваемым цилиндром принят равным 0,3 см. (Цифры на кривых указывают ширину индуктирующего провода в см)

Если зазор  $h$  отличается от 0,3 см, то следует пользоваться формулами перехода:

$$U_{\text{и}} = U_{\text{и}0,3} (h/0,3)^n; \quad (20)$$

$$I_{\text{и}} = I_{\text{и}0,3} (D_{\text{и}}/D_{\text{и}0,3})^{4/3}, \quad (21)$$

где  $h$  — принятый зазор, см;  $D_{\text{и}} = D_2 + 2h$  — действительный диаметр индуктора;  $D_{\text{и}0,3}$  — диаметр индуктора при  $h = 0,3$  см.

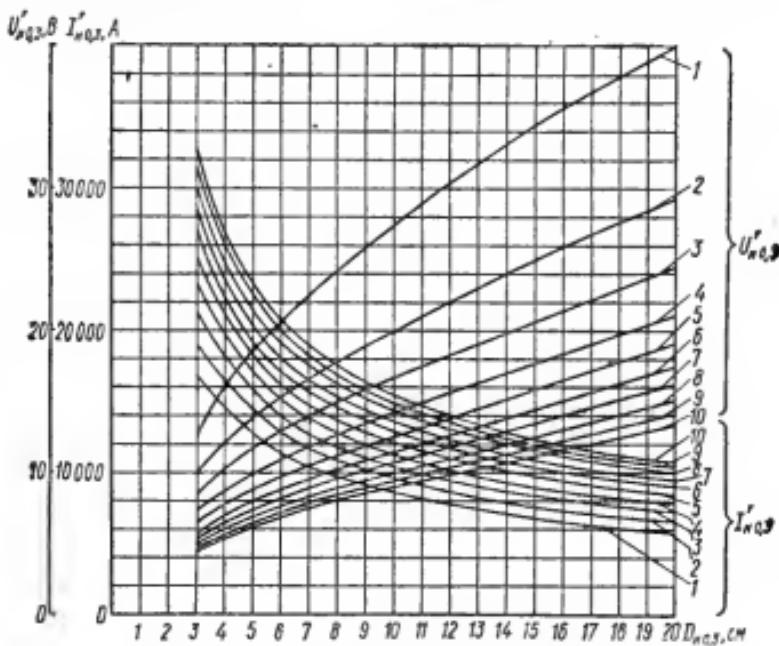


Рис. 13. Зависимость напряжения на индуктирующем проводе  $U'_{\text{и}0,3}$  и тока в индукторе  $I'_{\text{и}0,3}$  при частоте тока 2500 Гц и мощности 100 кВт, подводимой к индуктору, от диаметра одновиткового индуктора  $D_{\text{и}0,3}$ . Зазор между индуктором и нагреваемым цилиндром принят равным 0,3 см. (Цифры на кривых указывают ширину индуктирующего провода в см)

Показатель степени  $n$  зависит от частоты, так как активные и внутренние реактивные сопротивления, а также сопротивление рассеяния имеют различную зависимость от частоты.

Ниже приведены значения  $n$  в зависимости от частоты:

$f$ , кГц . . . . .	70 и выше	8—10	4	2,5
$n$ . . . . .	3/4	1/2	1/3	1/4

Расчет производится в следующем порядке.

1. По заданным частоте  $f$ , диаметру детали  $D_2$  и требуемой глубине закаленного слоя  $x_k$  определяем время нагрева  $t_k$  и удельную мощность  $p_0$ .

При частотах выше 250 кГц используются кривые рис. 8, при частоте 70 кГц значения  $t_k$  и  $p_0$  умножаются на соответствующие коэффициенты, как было указано выше. При частотах 10 000 и 2500 Гц используются кривые рис. 9 и 10 соответственно. Переход к частотам 8000 и 4000 Гц осуществляется как было указано.

2. Определяем мощность, подводимую к индуктору,

$$P_u = p_0 \pi D_2 a / 0,75, \quad (22)$$

где  $P_u$  — мощность, подведенная к индуктору, кВт;  $p_0$  — удельная мощность, кВт/см<sup>2</sup>;  $D_2$  — диаметр детали, см;  $a$  — ширина индуктора, см; 0,75 — средний к. п. д. индуктора.

Если нагревается участок поверхности или при непрерывном последовательном нагреве удельная мощность, полученная из рис. 8—10, увеличивается в 1,2 раза.

3. Определяем напряжение на индукторе и ток.

Диаметр индуктора равен:  $D_{u,0,3} = D_2 + 0,6$  см. Из рис. 11—13 определяем напряжение  $U'_{u,0,3}$  и ток  $I'_{u,0,3}$ , полученные при мощности, подведенной к индуктору, равной 100 кВт, при частотах 440, 10 и 2,5 кГц соответственно. Если к индуктору подведена мощность, отличающаяся от 100 кВт, и частота не равна указанной на рисунках, то пересчет напряжения и тока осуществляется по формулам (10) и (14). В частных случаях пересчета на другую мощность без изменения частоты, а также с частоты 440 на 70 кГц, с 10 000 на 8000 Гц и с частоты 2500 на частоту 4000 Гц, можно пользоваться формулами (12)—(19).

Если зазор  $h$  не равен 0,3 см, то для перехода к действительному зазору следует пользоваться формулами (20) и (21).

4. Определяем число витков индуктора. Если задано напряжение на вторичной обмотке закалочного трансформатора  $U_2$ , то число витков индуктора

$$w = U_2 / U_u,$$

где  $U_u$  — напряжение на одновитковом индукторе.

Если число витков получается дробным, то округляем его в меньшую сторону, так как расчет не учитывает падения напряжения на подводящих шинах.

Ток в индукторе и вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = I_u / w,$$

где  $I_u$  — ток в одновитковом индукторе.

Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_u = P_u / (U_u I_u).$$

Приведем три примера расчета индуктора: первый при частоте 440 кГц, второй при частоте 70 кГц и третий при частоте 4000 Гц. Исходные данные для всех расчетов одинаковы.

1. Даю:  $D_2 = 5$  см,  $x_k = 0,3$  см,  $a = 3$  см,  $h = 0,5$  см,  $f = 440$  кГц.

Определить: время нагрева  $t_k$ , мощность, подводимую к индуктору,  $P_u$ , напряжение  $U_u$  и ток в индукторе  $I_u$ .

1. Из рис. 8 находим:  $t_k = 17,5$  см,  $p_0 = 0,26$  кВт/см<sup>2</sup>.

2. Определяем [см. формулу (22)] мощность, подводимую к индуктору,

$$P_{\text{и}} = 0,26\pi 5 \cdot 3/0,75 = 16,3 \text{ кВт.}$$

3. Имеем условный диаметр индуктора  $D_{\text{и}0,3} = 5,6 \text{ см}$ . Из рис. 11 находим

$$U'_{\text{и}0,3} = 232 \text{ В}; \quad I'_{\text{и}0,3} = 4050 \text{ А.}$$

При мощности 16,3 кВт получим, пользуясь формулами (12) и (13),

$$U_{\text{и}0,3} = 0,1 \cdot 232 \sqrt{16,3} = 93,7 \text{ В}; \quad I_{\text{и}0,3} = 0,1 \cdot 4050 \sqrt{16,3} = 1635 \text{ А.}$$

В действительности зазор  $h = 0,5 \text{ см}$  и  $D_{\text{и}} = 6 \text{ см}$ .

Тогда имеем [формулы (20) и (21)]:

$$U_{\text{и}} = 93,7 (0,5/0,3)^{3/4} = 137 \text{ В}; \quad I_{\text{и}} = 1635 (6/5,6)^{4/3} = 1793 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_{\text{и}} = 16300/(137 \cdot 1793) = 0,0664.$$

4. Если на индукторе должно быть напряжение 300 В, то он должен иметь несколько витков

$$w = 300/137 \approx 2; \quad U_2 = 2 \cdot 137 = 274 \text{ В}; \quad I_2 = 1793/2 \approx 897 \text{ А.}$$

С помощью произведенных расчетов определяется напряжение на индуктирующем проводе. Падение напряжения на токоподводящих шинах индуктора в среднем составляет 15—25% от напряжения одновиткового индуктора. При многовитковых индукторах им можно пренебречь.

Если при выбранном зазоре между индуктором и деталью ламповый генератор не возбуждается при холодной детали, то следует увеличить зазор до 6—8 мм.

11. Частота  $f = 70 \text{ Гц}$ .

1.  $t_{\text{к}} = 17,5/1,2 \approx 14,6 \text{ с}; \quad p_0 = 1,2 \cdot 0,26 \approx 0,312 \text{ кВт/см}^2$ .

2.  $P_{\text{и}} = 0,312\pi 5 \cdot 3/0,75 = 19,6 \text{ кВт}$ .

3. По формулам (14) и (15) находим:

$$U_{\text{и}0,3} = 0,0294 \cdot 232 \sqrt{19,6} = 30,2 \text{ В};$$

$$I_{\text{и}0,3} = 0,158 \cdot 4050 \sqrt{19,6} = 2833 \text{ А.}$$

Так как зазор  $h = 0,5 \text{ см}$ , имеем

$$U_{\text{и}} = 30,2 (0,5/0,3)^{3/4} = 44,4 \text{ В}; \quad I_{\text{и}} = 2833 (6/5,6)^{4/3} \approx 3106 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_{\text{и}} = 19600/(44,4 \cdot 3106) = 0,142.$$

111. Частота  $f = 4000 \text{ Гц}$ .

1. Из рис. 10 находим:  $t_{\text{к}} = 2,6 \text{ с}, p_0 = 1,24 \text{ кВт/см}^2$ .

При частоте 4000 Гц получим  $t_{\text{к}} = 1,25 \cdot 2,6 = 3,25 \text{ с}; p_0 = 0,83 \cdot 1,24 = 1,03 \text{ кВт/см}^2$ .

2.  $P_{\text{и}} = 1,03\pi 5 \cdot 3/0,75 = 64,7 \text{ кВт}$ .

3. Из кривых рис. 13 находим:

$$U'_{\text{и}0,3} = 12,3 \text{ В}; \quad I'_{\text{и}0,3} = 14500 \text{ А.}$$

По формуле (18) и (19) получим:

$$U_{\text{ио,3}} = 0,137 \cdot 12,3 \sqrt{64,7} \approx 13,6 \text{ В};$$

$$I_{\text{ио,3}} = 0,0868 \cdot 14\,500 \sqrt{64,7} \approx 10\,120 \text{ А.}$$

Если зазор  $h = 0,5$  см и  $D_{\text{и}} = 6$  см, имеем:

$$U_{\text{и}} = 13,6 (0,5/0,3)^{1/2} \approx 16,1 \text{ В}; \quad I_{\text{и}} = 10\,120 (6/5,6)^{1/2} \approx 11\,100 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_{\text{и}} = 64\,700 / (16,1 \cdot 11\,100) = 0,362.$$

В приведенных примерах считалось, что закалке способом одновременного нагрева подвергается вся поверхность цилиндра длиной 3 см. Если ширина индуктора  $a$  меньше длины цилиндра, то, как указывалось выше, мощность увеличивается в 1,2 раза. При средних частотах закалочные индукторы почти всегда выполняются одновитковыми.

Если закалке подвергается шестерня или подобная ей по форме деталь, то при электрическом расчете в качестве диаметра детали следует принять диаметр начальной окружности. Тогда зазор будет равен полуразности диаметра индуктора и диаметра начальной окружности. Точность этого расчета ниже, чем предыдущих, но он все же может быть использован как ориентировочный.

## **II. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

### **8. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Простейшая форма индуктора представляет собой одно- или многовитковый соленоид, помещенный винтре отверстия, стеки которого подвергаются нагреву (рис. 14). При многовитковом индукторе один из выводов проходит внутри него, другой может прямо идти от крайнего витка к понижающему трансформатору. Обычно стремятся оба вывода располагать возможно ближе друг к другу, на расстоянии нескольких миллиметров, с тем чтобы индуктивность их была минимальной. При большой длине выводов применяют коаксиальный токоподвод, обладающий наименьшей индуктивностью.

Все сказанное ранее о конструкции контактных колодок, выборе ширины индуктора, толщины индуктирующего провода и об устройстве охлаждения справедливо и для рассматриваемых индукторов. Однако необходимо иметь в виду, что такие индукторы, в особенности при диаметрах меньше 100 мм, имеют электрический к. п. д. заметно меньший, чем индукторы для нагрева внешних поверхностей. Это можно пояснить сравнением условий работы индукторов для нагрева внешних и внутренних поверхностей. В первом случае та часть магнитного потока индуктора (главный магнитный поток), которая проходит через нагреваемую деталь и вызывает нагревающий ее индуктированный ток, замыкается с наружной стороны индуктора в зоне с малой напряженностью магнитного поля.



Рис. 14. Многовитковый индуктор для закалки внутренней поверхности, используемый преимущественно на радиочастоте

индуктора и при понижении частоты. Очевидно, что следствием этого является относительное увеличение потерь в индукторе и понижение к. п. д.

Другой причиной ухудшения работы индуктора является «кольцевой» эффект, в результате которого ослабляется напряженность магнитного поля на поверхности нагреваемой детали.

При отсутствии детали можно считать, что весь ток сконцентрирован на внутренней поверхности индуктора в слое, толщина которого приблизительно равна глубине проникновения тока. Если поместить индуктор внутрь отверстия нагреваемой детали, то за счет эффекта близости ток в большей или меньшей степени будет проходить и по внешней поверхности индуктирующего провода, и в сечении последнего установится некоторое результатирующее распределение тока. При этом ток концентрируется на внешней поверхности тем сильнее, чем меньше зазор, так как с уменьшением зазора действие эффекта близости усиливается. При этом усиливается поле в зазоре и на поверхности детали, а следовательно, усиливается и индуктированный в ней ток.

Для того чтобы такого рода индукторы имели достаточно высокий электрический к. п. д., необходимо применять зазоры не более 2—3 мм, а при диаметрах меньше 50 мм желательно иметь зазор не более 1 мм, так как с уменьшением диаметра действие кольцевого эффекта резко возрастает.

Для закалки отверстий диаметром меньше 100 мм с помощью рассмотренных простых индукторов следует использовать радиочастоты, которые в этом случае позволяют достигать значительно лучшей магнитной связи с нагреваемой деталью и, следовательно, более высокого электрического к. п. д. индуктора. Закалка внутренних поверхностей диаметрами более 100 мм может быть осуществлена и на средних частотах. Во всех случаях электрический к. п. д. оказывается несколько ниже, чем у соответствующих индукторов для закалки внешних поверхностей.

Однако закалить детали с отверстиями диаметром меньше 30 мм даже при радиочастотах, затруднительно вследствие сильного действия кольцевого эффекта и относительно большой радиальной высоты индуцирующего провода. Большая радиальная высота необходима для того, чтобы пропустить достаточное количество охлаждающей воды. В этом случае возможно применить метод закалки «под водой», заключающийся в том, что индуктор, изготовленный из тонкого и сплошного провода, вместе с деталью погружается в воду, которая охлаждает индуктор [3]. Потеря теплоты деталью не велика, так как около нагретой поверхности образуется паровая рубашка.

При такой конструкции индуктора значительно ослабляется кольцевой эффект и уменьшается магнитное сопротивление на участке внутри индуктора вследствие увеличения площади отверстия.

Значительно лучшие результаты, чем с описанными простыми индукторами, можно получить при установке на индуцирующем проводе магнитопровода (рис. 15). Магнитное сопротивление резко уменьшается, а ток вытесняется к открытой стороне паза на внешнюю сторону индуцирующего провода. Кольцевой эффект в этом случае не играет роли, так как действие магнитопровода оказывается более сильным.

В качестве материала магнитопровода при частоте 2500 Гц можно применить электротехническую сталь Э41 толщиной 0,35 мм; при частоте 8000 Гц желательно толщину листов уменьшить до 0,2 мм стали (Э44). При радиочастотах следует применять ферриты.

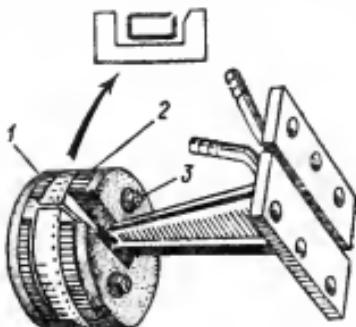


Рис. 15. Индуктор с магнитной цепью для закалки внутренней цилиндрической поверхности непрерывно-последовательным способом:

1 — индуцирующий провод с отверстиями на ребре для выпуска закалочной воды; 2 — магнитопровод, вытесняющий ток из наружу поверхность индуктора и повышающий его к. п. д. (свободный выход закалочной воды обеспечен скосом по краю башмака магнитопровода); 3 — изоляционные шайбы для крепления магнитопровода

Применение ферритовых магнитопроводов полезно и при средних частотах в индукторах с диаметрами меньше 50 мм, так как в этом случае представляется затруднительным конструктивное выполнение магнитопровода из отдельных листов вследствие большой разницы между его внешним и внутренним диаметрами.

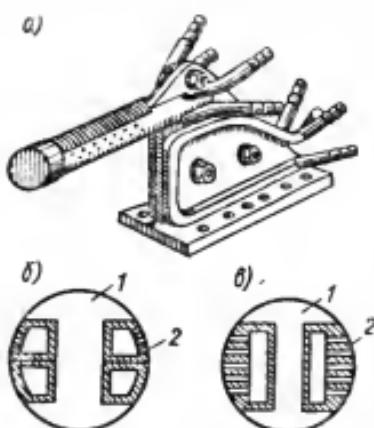


Рис. 16. Петлевой индуктор с магнитопроводом для закалки внутренних поверхностей способом одновременного нагрева при вращении закаливаемой детали: а — общий вид индуктора, б — конструкция с отдельными камерами для охлаждения индуктора и для выхода закалочной воды; в — конструкция без постоянного охлаждения: 1 — магнитопровод; 2 — индуктирующий провод

верхностью полезно, чтобы башмаки магнитопровода выступали на 0,5—1 мм.

6. В индукторах для закалки непрерывно-последовательным способом, когда закалочная вода выпускается из самого индуктирующего провода, с внутренней стороны соответствующего башмака магнитопровода должен делаться скос с тем, чтобы струи воды не ударялись о край башмака. При этом закалочная вода одновременно охлаждает и магнитопровод.

Электрический к. п. д. индуктора с магнитопроводом высок и обычно близок к 80%, а часто доходит до 85—87%. О расчете индукторов с магнитопроводами будет сказано ниже.

При закалке деталей с отверстиями диаметром 25—40 мм применение цилиндрических индукторов затруднительно. Более удобно применять индукторы петлевого типа с магнитопроводом (рис. 16). Прямая и обратная ветви индуктирующего провода

При конструировании индукторов следует руководствоваться следующими соображениями.

1. Ширина паза в магнитопроводе должна быть равна заданной ширине нагретой полосы.

2. Ширина индуктирующего провода должна быть на 1—3 мм меньше ширины паза, так чтобы можно было изолировать индуктирующий провод от магнитопровода. В качестве изоляции обычно употребляют жароупорный микарт.

3. Индукция в магнитопроводе из электротехнической стали не должна превышать 0,6 Т при 2500 Гц и 0,3 Т при 8000 Гц. При радиочастотах она должна составлять 0,1—0,15 Т. Практически это выполняется, если ширина башмака магнитопровода составляет 0,3—0,75 от ширины паза.

4. Магнитопровод из феррита должен работать при индукциях не выше 0,3 Т при частоте 8000 Гц и 0,1 Т при радиочастотах. Это выполняется, если ширина башмака магнитопровода составляет 0,4—0,75 от ширины паза.

5. Для защиты индуктирующего провода от случайного соприкосновения с нагреваемой поверхностью башмаки магнитопровода выступали

располагаются вдоль оси отверстия. На поверхности нагреваются две полосы. Если сообщить детали быстрое вращение, то нагревается вся поверхность.

Электрический к. п. д. теплового индуктора так же высок, как и колыцевого, но нагрузка меди больше, так как энергия, необходимая для нагрева всей поверхности отверстия, сконцентрирована в узком и индуктирующем проводе, покрывающем лишь часть поверхности.

Подобный индуктор с ферритным сердечником в виде пластиинки, ширина и длина которой равны ширине и длине индуктирующего провода, а толщина — расстоянию между проводами, может быть применен для закалки отверстий диаметром более 15 мм как на частоте 8000—10 000 Гц, так и при радиочастотах.

Петлевой индуктор может быть применен и для закалки непрерывно-последовательным способом. В этом случае длина петли должна быть значительно меньше глубины отверстия.

Для самых мелких отверстий применяют индукторы стержневого типа. Индуктирующий провод представляет собой цилиндрический стержень, который и пропускается в отверстие. К концам стержня подводятся шины для присоединения к понижающему трансформатору. Индуктированный в детали ток проходит вдоль образующей отверстия и замыкается через внешнюю поверхность детали. Нагревается лишь внутренняя поверхность детали, так как плотность тока на ее внешней поверхности мала. Следует отметить, что поверхность отверстия нагревается неравномерно. Вследствие колыцевого эффекта ток в индукторе концентрируется на стороне провода, обращенной к трансформатору, — на внутренней стороне контура. В результате эффекта близости на этой же стороне наблюдается наибольшая плотность тока в детали и, следовательно, наибольший ее нагрев. Поэтому, если требуется равномерный нагрев всей поверхности детали, то ей необходимо сообщить быстрое вращение.

Наиболее высокий электрический к. п. д. индуктора имеет место, если толщина стенки детали в 2—3 раза больше горячей глубины проникновения тока, так как при этом обратная ветвь тока в детали не оказывает ослабляющего влияния на прямую. Дальнейшее увеличение толщины стенки не влияет на к. п. д.

Конструкция стержневого индуктора может быть выполнена, например, следующим образом. Индуктирующий провод изготавливается из медной трубки, в которую с одной стороны подается вода. Часть трубки, находящаяся внутри нагреваемого отверстия, является индуктирующим проводом (рис. 17). Участок трубки, являющийся продолжением индуктирующего провода и снабженный отверстиями для выхода закалочной воды, во время нагрева находится вне нагреваемой детали. Вода, проходя по индуктирующему проводу, охлаждает его и выливается через отверстия в сливную ванну. Ток подводится к индуктирующей части шинами, присоединенными к ней посредством зажимов. Последние обычно приводятся в действие от гидравлической системы. Когда нагрев оканчивается, зажимы размыкаются, трубка перемещается на длину индуктирующей части и в нагретое отверстие входит участок с отверстиями для выпуска воды. Вода, выливаясь из отверстий, закаливает нагретую поверхность.

Иногда внутрь индуктирующего провода помещают перегородку, разделяющую его вдоль на две камеры. Через одну половину пропускают проточную воду, которая выливается с противоположной стороны. Во вторую половину воду впускают после окончания нагрева. Вода, выливаясь через отверстия, просверленные в этой половине, на нагретую поверхность, закаливает ее. При такой конструкции легче применять ручные зажимы, так как

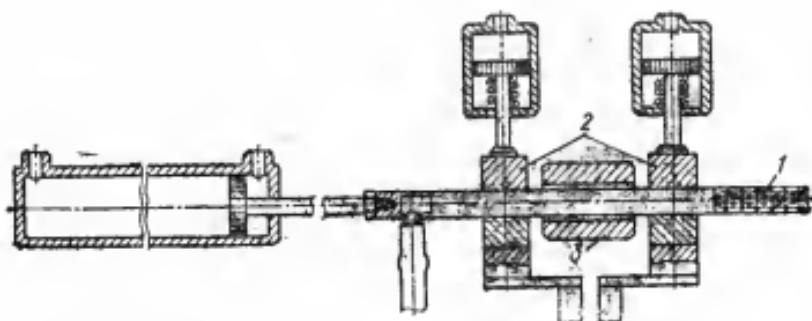


Рис. 17. Схема конструкции стержневого индуктора, применяемого в станках-автоматах для закалки отверстий малого диаметра;

1—отверстия для непрерывного свободного выхода закалочной воды; 2—зажимы для подвода тока к индуктирующему проводу; 3—закаливаемая деталь

пуск закалочной воды не связан с необходимостью перестановки индуктирующего провода, как это имело место в первой описанной конструкции. Первая конструкция, однако, предпочтительней в производственных условиях, так как охлаждение индуктирующего провода в ней осуществляется надежнее. Если подвижные части индуктора приводятся в движение от гидравлической или пневматической системы, то пауза между концом нагрева и началом охлаждения может быть очень малой.

## 7. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Индукторы для закалки плоских поверхностей (рис. 18) выполняются в виде плоских спиралей или одиночных витков, располагающихся над нагреваемой поверхностью. Индуктированный ток вследствие эффекта близости концентрируется под индуктором. При неподвижном индукторе можно наблюдать появление нагретой зоны, формой которой повторяет конфигурацию индуктора. В любой точке нагреваемой плоскости ток индуцируется прямой и обратной ветвями индуктора. Вследствие этого результирующий ток оказывается ослабленным по сравнению с индуцируемым одной ближайшей ветвью, что приводит к уменьшению мощности, сообщаемой нагреваемой поверхности, и к уменьшению электрического к. п. д. индуктора. Поэтому расстоя-

ние между прямой и обратной ветвями индуктора должно быть во всяком случае больше четырех зазоров между индуктором и нагреваемой поверхностью. Однако при такой конструкции индуктора ширина нагретой зоны относительно велика, что не всегда допустимо. Магнитное сопротивление по пути замыкания главного магнитного потока в воздухе велико, что приводит к падению к. п. д.

Ток в индуктирующем проводе одновиткового индуктора в результате совместного действия кольцевого эффекта и эффекта близости частично протекает по стороне, обращенной к нагреваемой поверхности, и частично по внутренней боковой поверхности витка. Это усиливает магнитное поле в промежутке между проводами индуктора. Иногда индуктирующий провод выполняется в виде зигзага, расположенного над нагреваемой поверхностью.

Если требуется получить узкую нагретую зону, то можно обратные ветви индуктора расположить над прямыми, сделав их для уменьшения потерь значительно шире индуктирующего провода. Тогда при достаточном расстоянии первые, т. е. токоподводы, практически не будут индуктировать ток в нагреваемой поверхности. Ток в индуктирующем проводе под влиянием кольцевого эффекта будет частично стягиваться на внутреннюю поверхность.

К этому случаю относится все сказанное по поводу индукторов для нагрева внутренних поверхностей. Кольцевой эффект ослабляется по мере удаления обратной ветви, но при этом в ней возрастают активные потери. Коэффициент полезного действия таких индукторов обычно бывает меньше 60%. В этом случае следует применять индукторы с магнитопроводами. Типичная конструкция индуктора осуществляется следующим образом.

На прямой индуктирующий провод надевается П-образный магнитопровод, выполненный из листов электротехнической стали или феррита, чем ликвидируется действие кольцевого эффекта. Магнитопровод обращен открытой стороной паза к нагреваемой поверхности. Индуктированный ток концентрируется под пазом магнитопровода. Длина нагретой полосы примерно равна длине магнитопровода.

Обратные ветви индуктированного в нагреваемой поверхности тока располагаются по обе стороны от прямой, причем плотность тока в обратных ветвях мала, так как ток расходится в обе стороны и распределяется по всей поверхности. Вследствие этого нагрев сконцентрирован только под индуктирующим проводом (рис. 19). Подводящие шины располагаются сверху. Для

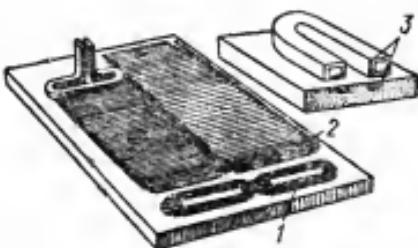


Рис. 18. Одновитковый индуктор для закалки плоской поверхности непрерывно-последовательным способом:

1—цвета побежалости соответствуют пути прохождения индуктирующего тока; 2—поверхность, закаленная при движении индуктора; 3—распределение тока в сечениях индуктора и детали

уменьшения активного сопротивления они выполняются постепенно расширяющимися от ширины индуктирующего провода до ширины вторичной обмотки понижающего трансформатора. С целью получения достаточной механической прочности подводящие шины выполняются из медных листов толщиной 6—8 мм.

Часто такие индукторы делают сборными. Индуктирующий провод припаивают к массивным колодкам, которые привинчиваются к горизонтальным частям токоподводящих шин. Места контактов у шин и колодок пришабриваются. Охлаждение шин

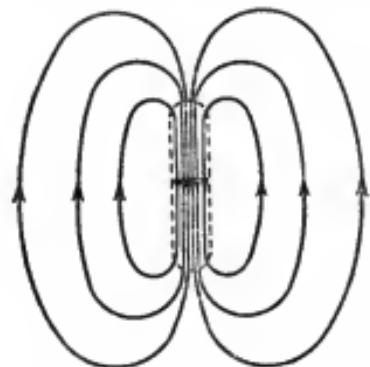


Рис. 19. Распределение индуктированного тока в нагреваемой поверхности при расположении прямого и обратного проводов индуктора в вертикальной плоскости и под индуктором с магнитопроводом. Штриховой линией обозначена зона нагрева

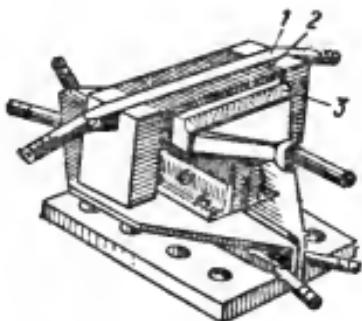


Рис. 20. Индуктор с магнитопроводом для закалки плоской поверхности непрерывно-последовательным способом:

1 — индуктирующий провод;  
2 — магнитопровод; 3 — душевое устройство для подачи закалочной воды

осуществляется посредством припаянных к ним трубок (рис. 20).

При конструировании индуктирующего провода следует руководствоваться теми же указаниями, что и в случае индукторов для закалки внутренних поверхностей.

Если зона закалки должна быть переменной ширины, то можно применить секционированные индукторы с питанием секций от отдельных закалочных трансформаторов. При подходе индуктора к месту изменения ширины зоны нагрева производят включение или отключение тока в цепи трансформатора соответствующей секции. Примером может служить индуктор для закалки лемехов, имеющий вывод средней точки индуктирующего провода (рис. 21). Такого рода индукторы могут иметь и несколько электрически изолированных один от другого индуктирующих проводов, которые можно включать в производительных комбинациях<sup>1</sup>.

При закалке плоских поверхностей чаще всего применяется непрерывно-последовательный нагрев. Индукторы для

<sup>1</sup> См. Библиотечку, вып. 2.

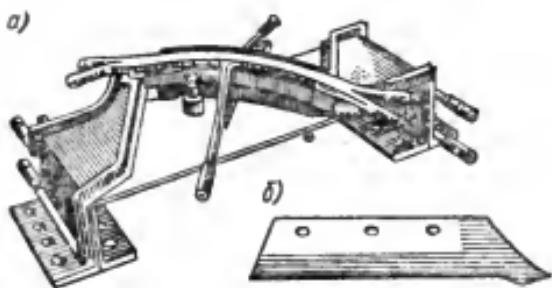


Рис. 21. Индуктор для закалки лемехов с выводом средней точки индуктирующего провода: *а* — индуктор; *б* — лемех

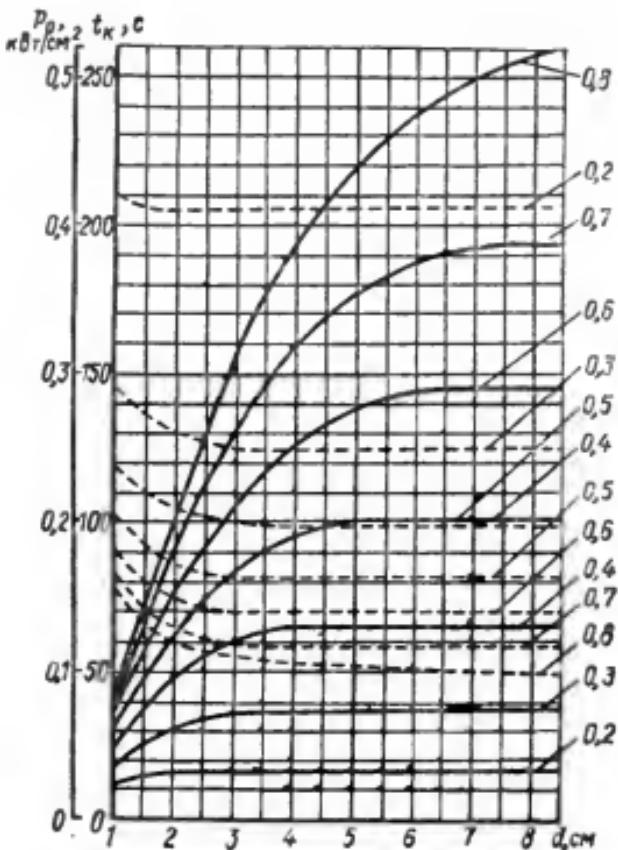


Рис. 22. Зависимость времени нагрева  $t_K$  (сплошные линии) и удельной мощности  $p_0$  (штриховые линии) от толщины плоской детали  $d$  при частоте выше 250 кГц. (Цифры на кривых указывают глубину закаленного слоя в см)

одновременного нагрева полосы отличаются от приведенного на рис. 20 лишь более массивным индуктирующим проводом, толщина передней стенки которого должна выбираться по формуле (7). Ширина закаленной полосы составляет 0,8—0,9 от ширины паза магнитопровода. Длина пакета магнитопровода должна примерно равняться длине закаливаемой полосы.

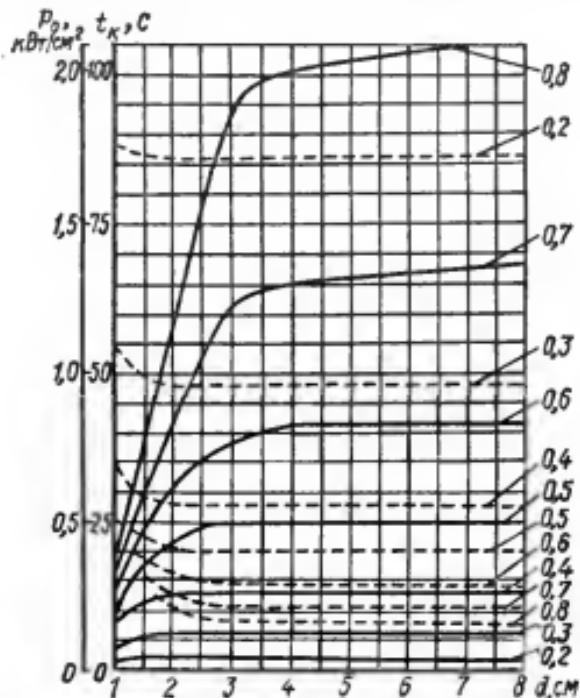


Рис. 23. Зависимость времени нагрева  $t_k$  (сплошные линии) и удельной мощности  $p_0$  (штриховые линии) от толщины плоской детали  $d$  при частотах 8000—10000 Гц. (Цифры на кривых указывают глубину закаленного слоя в см)

На рис. 22—24 приведены зависимости времени нагрева и удельной мощности от толщины плоской детали для различных глубин закаленного слоя при радиочастоте и частотах 8000—10000 и 2500 Гц, вычисленные для конструкционной стали при температуре нагрева поверхности 900 °С. Эти же зависимости с несколько меньшей точностью могут быть использованы и для нагрева внутренних поверхностей. Если плоская деталь нагревается с двух сторон, то в качестве  $d$  при пользовании графиками следует брать половину ее толщины. Как указывалось выше, при отклонении температуры поверхности от 900 °С на 50 °С время нагрева изменяется примерно в 1,7 раза, а удельная мощность — в 1,5 раза.

Удельную мощность и время нагрева для частоты 4000 Гц можно получить из рис. 24. Как было указано раньше, время умножается на 1,25 и мощность на 0,83.

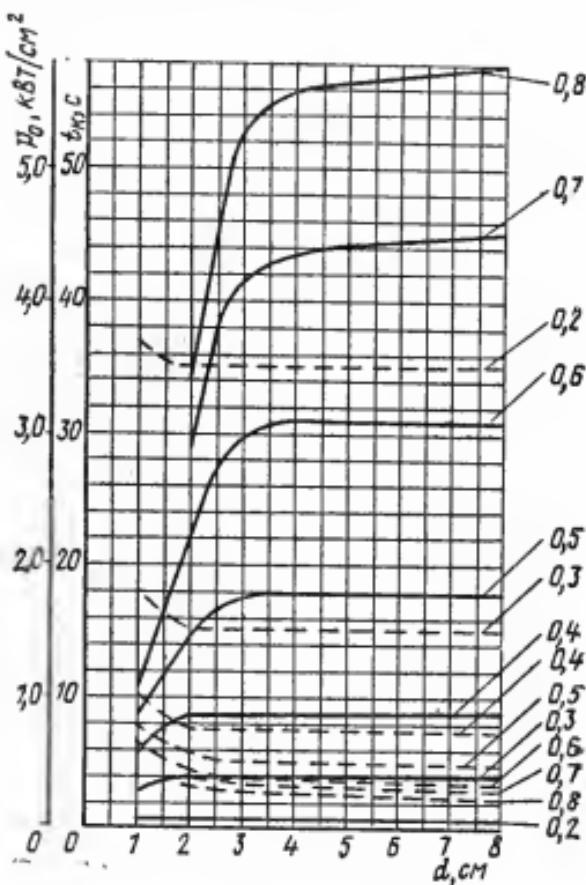


Рис. 24. Зависимость времени нагрева  $t_k$  (сплошные линии) и удельной мощности  $p_0$  (штриховые линии) от толщины плоской детали  $d$  при частоте 2500 Гц. (Цифры на кривых указывают глубину закаленного слоя в см)

На рис. 25 приведен эскиз плоского индуктора, на котором указаны условные обозначения, использованные в приводимой ниже схеме приближенного расчета.

Теоретические расчеты и эксперименты показали, что для различных индукторов при определенной частоте и удельной мощности напряжение на единицу длины индуктирующего провода и ток, рассчитанный на единицу ширины паза, при зазорах 4—6 мм колеблются в сравнительно небольших пределах,

В среднем можно считать, что при удельной мощности 1 кВт/см<sup>2</sup> будем иметь:  
при частоте 10 000 Гц

$$U_0 = 1,45 \text{ В/см}; \quad I_0 = 2400 \text{ А/см};$$

при частоте 8000 Гц

$$U_0 = 1,3 \text{ В/см}; \quad I_0 = 2500 \text{ А/см};$$

при частоте 4000 Гц

$$U_0 = 0,93 \text{ В/см}; \quad I_0 = 3000 \text{ А/см};$$

при частоте 2500 Гц

$$U_0 = 0,75 \text{ В/см}; \quad I_0 = 3400 \text{ А/см},$$

где  $U_0$  — напряжение на 1 см длины индуктирующего провода при удельной мощности 1 кВт/см<sup>2</sup>;  $I_0$  — ток на 1 см ширины паза в магнитопроводе при удельной мощности 1 кВт/см<sup>2</sup>.

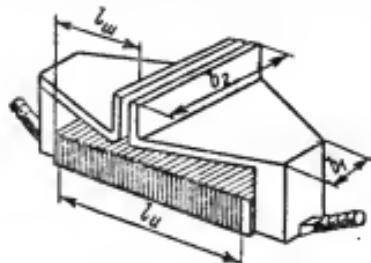


Рис. 25. Эскиз индуктора с магнитопроводом для закалки и сплавления способом

Если рассчитывается индуктор для закалки плоской детали, то достаточно определить только реактивное сопротивление подводящих шин. Активным сопротивлением их можно пренебречь, так как ширина шин обычно много больше ширины индуктирующего провода. При этом достаточно рассчитать реактивное сопротивление только горизонтального участка, которое значительно больше, чем сопротивление остальных участков.

Реактивное сопротивление обоих горизонтальных участков токоподводящих шин индуктора, изображенного на рис. 25, можно определить по формуле

$$x_{ш} = 2,5 \cdot 10^{-8} / l_{ш} \left( 2,3 \lg \frac{4l_{ш}}{b' + \Delta_1} + 0,5 \right),$$

где  $x_{ш}$  — реактивное сопротивление обоих горизонтальных участков токоподводящих шин, Ом;  $f$  — частота, Гц;  $l_{ш}$  — длина одного горизонтального участка токоподводящих шин, см;  $\Delta_1$  — глубина проникновения тока в меди, см;  $b'$  — эквивалентная ширина шины, см;

$$b' = (b_1 + b_2) / 2 \text{ см.}$$

Здесь  $b_1$  и  $b_2$  — ширина шины в начале и конце, см.

При вычислении полного напряжения на индукторе напряжение на индуктирующем проводе и на шинах складываются арифметически, что, однако, не дает большой ошибки вследствие избытка коэффициента мощности индуктора.

К. п. д. таких индукторов находится в пределах 75—88%. Примем для него среднюю величину  $\eta_a = 80\%$ . В качестве при-

мера рассчитаем индуктор для закалки непрерывно-последовательным способом плоского тела шириной 69 см и толщиной 4 см на глубину 0,6 см при частоте 2500 Гц.

1. Из рис. 24 находим

$$t_k' = 31 \text{ с}; \quad p_0 = 0,36 \text{ кВт/см}^2.$$

2. Ширина паза в магнитопроводе

$$a = 0,64 P_r / (I_n p_0) \text{ см},$$

где  $a$  — ширина паза в магнитопроводе, см;  $P_r$  — мощность генератора, кВт;  $I_n$  — длина закаленной полосы, примерно равная длине магнитопровода, см.

Пусть задана мощность генератора  $P_r = 100$  кВт, тогда имеем

$$a = 0,64 \cdot 100 / (69 \cdot 0,36) \approx 2,5 \text{ см}.$$

3. Ширина индуктирующего провода, если оставить на изоляцию по 0,15 см с каждой стороны,

$$b = a - 2\Delta b \text{ см}; \quad b = 2,5 - 0,3 = 2,2 \text{ см},$$

где  $b$  — ширина индуктирующего провода, см;  $\Delta b$  — толщина изоляции, см.

4. Высота индуктирующего провода выбирается исходя из наличия сортамента круглых трубок, из которых изготавливается прямоугольная трубка для провода. При этом нужно иметь в виду, что для пропуска воды высота трубки в свету не должна быть меньше 0,5 см.

5. Ширина башмака магнитопровода

$$c = (0,3 \dots 0,75) a = 0,75 \dots 1,87 \text{ см}.$$

Выбираем  $c = 1$  см.

6. Напряжение на индуктирующем проводе

$$U \approx I_n U_0 \sqrt{p_0}; \quad U = 69 \cdot 0,75 \sqrt{0,36} \approx 31 \text{ В.}$$

7. Ток в индукторе

$$I_n \approx a I_0 \sqrt{p_0}; \quad I_n = 2,5 \cdot 3400 \sqrt{0,36} \approx 5100 \text{ А.}$$

8. Определяем реактивное сопротивление токоподводящих шин с размерами

$$l_{ш} = 34,4 \text{ см}; \quad b_1 = 4 \text{ см}; \quad b_2 = 18,5 \text{ см},$$

где последний размер определяется длиной контактной колодки понижающего трансформатора. При частоте  $f = 2500$  Гц длина колодки обычно равна 18,5 см

$$b' = (18,5 + 4) / 2 = 11,25 \text{ см};$$

$$x_{ш} = 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2500 \cdot 34,4 \left( 2,3 \lg \frac{4 \cdot 34,4}{11,25 + 0,14} + 0,5 \right) \approx \\ \approx 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

## 9. Падение напряжения на токоподводящих шинах

$$U_{ш} \approx 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 100 = 33,1 \text{ В.}$$

## 10. Напряжение на индукторе

$$U_{и} \approx 31 + 33,1 = 64,1 \text{ В.}$$

## 11. Мощность, подводимая к индуктору,

$$P_{и} = \rho_0 l_{и} a / \eta_{и} = 0,36 \cdot 69 \cdot 2,5 / 0,8 = 77,5 \text{ кВт;}$$

$$\cos \phi_{и} = 77,5 \cdot 10^3 / (64,1 \cdot 5 \cdot 100) \approx 0,24.$$

Когда рассчитывается цилиндрический индуктор для закалки внутренней поверхности, за длину магнитопровода  $l_{и}$  принимается длина окружности проходящей в середине зазора,

$$l_{и} = \pi (D_1 + D_2) / 2 \text{ см,}$$

где  $D_1$  — внешний диаметр индуктирующего провода;  $D_2$  — внутренний диаметр закалываемой детали.

Реактивное сопротивление токоподводящих шин в этом случае можно не рассчитывать, так как оно много меньше реактивного сопротивления индуктирующего провода, поскольку токоподводящие шины представляют собой сравнительно широкие пластины, расположенные на расстоянии 2—3 мм одна от другой.

# III. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

## 8. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Детали зачастую имеют сложную форму. В этих случаях конструкции индукторов отличаются от описанных выше. Однако принципы конструирования, основанные на таких явлениях как эффект близости, кольцевой эффект, одностороннее вытеснение тока магнитопроводами и концентрация ими магнитного поля на отдельных участках, остаются прежними.

Одним из характерных примеров закалки тела вращения является закалка поверхностей, внешних или внутренних, имеющих коническую или ступенчатую форму. В этом случае необходимо выполнять индукторы так, чтобы участкам с меньшими диамет-

рами сообщалась меньшая мощность. Только при таком условии нагрев будет равномерным.

Равномерный нагрев конической детали (рис. 26) возможно получить, применяя многовитковый цилиндрический индуктор. В местах, где наблюдается перегрев, следует увеличить шаг витков, раздвигая их без переделки индуктора. Тогда в этом месте уменьшится напряженность магнитного поля и, следовательно, нагрев. Тот же эффект достигается соответствующим изменением зазора при постоянном шаге витков. Однако этот способ хуже, так как ослабление нагрева достигается за счет увеличения зазора на

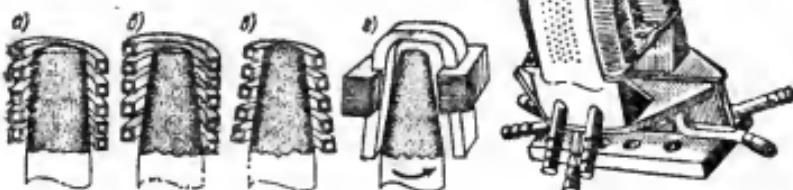


Рис. 26. Способы выравнивания нагрева конических деталей: *а* — разность диаметров вершины и основания мала; *б* — разность диаметров основания и вершины значительна; *в* — способ, пригодный в случаях *а* и *б*; *г* — выравнивание нагрева с помощью магнитопровода на петлевом индукторе при обязательном вращении детали

Рис. 27. Петлевой индуктор с магнитопроводом для закалки внутренней конической поверхности способом одновременного нагрева при вращении детали

этом участке, а следовательно, за счет снижения к. п. д. индуктора. Подгонка зазора связана с коренной переделкой индуктора.

При малой разнице в диаметрах у концов усеченного конуса меньший шаг витков следует делать у его основания, так как поверхностный эффект одинаково резко выражен во всех точках поверхности. При большой разнице диаметров возможно два случая. В первом, обычно соответствующем радиочастотам, поверхностный эффект ярко выражен во всех точках поверхности, что отличается от описанного выше. Во втором случае, обычно соответствующем средним частотам, вблизи тонкого конца поверхностный эффект выражен слабо. Тогда к. п. д. индуктора на этом участке падает и нагрев ослабевает. Для выравнивания нагрева необходимо уменьшить шаг витков у вершины. Если поднять температуру тонкого конца таким образом не удается, то следует повысить частоту. При закалке внутренних поверхностей следует применять магнитопроводы.

При большой разности диаметров усеченного конуса или при ступенчатой форме детали целесообразнее применять петлевые индукторы также конической (рис. 26 и 27) или ступенчатой

формы с магнитопроводами. С помощью последних можно выровнять нагрев. На участке с меньшим диаметром следует делать зазор большей величины. Тогда за счет более слабого действия эффекта близости индуцированный ток распределяется в более широкой полосе, вследствие чего уменьшится его плотность, а следовательно, и выделяемая энергия. Можно также избежать перегрева, сняв часть магнитопровода.

Лучшие результаты [7] можно получить, применяя индуктор с переменной шириной провода. Чем шире провод, тем (при том же токе в нем) меньше напряженность магнитного поля, а следовательно, и мощность, передаваемая в деталь. Таким образом, на участке с малым диаметром провод должен быть шире, чем на участке с большим диаметром. Ориентировочно ширина индуцирующего провода при двух участках может быть выбрана по соотношению

$$a_2/a_1 \approx D_{21}/D_{22},$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — ширина провода на участках с большим и малым диаметрами соответственно;  $D_{21}$  и  $D_{22}$  — больший и меньший диаметры соответственно.

Это соотношение действительно тогда, когда поверхностный эффект резко выражен на всех участках. Вообще можно указать, что для усиления нагрева ширину прореза на соответствующем участке следует уменьшить, и наоборот. Соотношение легко распространить на любое число участков.

## 9. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ТОРЦОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Если против торцовой поверхности поместить индуктор, имеющий вид широкого кольца, то ток смеетсяся на внутреннюю его сторону, вследствие чего равномерный нагрев всей поверхности станет невозможным. Индуктор следует выполнять в виде зигзага, а деталь быстро вращать (рис. 28). Тогда путь индуцированного тока вследствие эффекта близости будет повторять форму пути тока в индукторе, а в результате вращения нагрев как бы растушуется по всей поверхности.

Удобно выполнить индуктор в виде широкого кольца с прорезями изнутри. Такой индуктор не имеет принципиальных отличий от рассмотренного выше. Иногда полезно поместить внутрь индуктора магнитопровод. Если при этом требуется закалить узкое кольцо, то прорезей можно не делать.

## 10. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ШЕСТЕРЕН БОЛЬШОГО МОДУЛЯ

Закалка шестерен модуля  $m > 8$  производится по одному зубу. Для закалки только боковых поверхностей зуба применяют петлевые индукторы (рис. 29). Внутри петли помещают нагреваемый зуб. В этом случае индукторы выполняют С

магнитопроводами, служащими для концентрации нагрева на боковых поверхностях зуба и для защиты соседних зубьев от нагрева. Почти весь магнитный поток проходит по магнитопроводу, не заходя в соседние зубья. Длина магнитопровода делается на 2–4 мм меньше длины зуба.

Петлевой индуктор можно применить и при радиочастотах; тогда магнитопроводы выполняют из электротехнической стали толщиной 0,05 мм. Если такая сталь отсутствует, индуктор выполняют без магнитопроводов. Чтобы при этом не нагревались

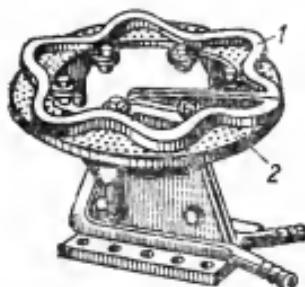


Рис. 28. Индуктор для закалки торцовой поверхности способом одновременного нагрева при вращении детали: 1 — индуктирующий провод; 2 — душевое устройство

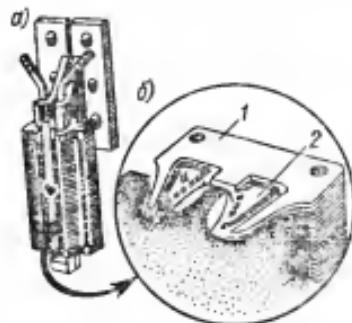


Рис. 29. Индуктор с магнитопроводом для закалки боковых поверхностей зубьев шестерен большого модуля: а — общий вид индуктора; б — эскиз поперечного сечения индуктора с закаленной шестерней: 1 — магнитопровод; 2 — индуктирующий провод

соседние зубья, необходимо максимально удалить от них стенки водяной камеры. Для этого последняя припавается к индуктирующему проводу под острым углом. Сам индуктирующий провод изготавливается в обоих случаях из шины толщиной 6–8 мм, и в нем в шахматном порядке просверливаются отверстия для подачи закалочной воды после окончания нагрева.

Для тяжело нагруженных шестерен получающаяся при описанном методе форма закаленного слоя часто оказывается непримлемой. У основания зуба в месте персхода закаленного слоя к незакаленному металлу наблюдаются растягивающие напряжения, что понижает усталостную прочность шестерни. Чтобы избежать этого, следует закалке подвергать также и впадины. При этом индуктирующий провод располагают вдоль окружности шестерни, устанавливая против впадин магнитопроводы, входящие при рабочем положении индуктора внутрь впадин. Индуктор в зависимости от мощности и производительности может быть выполнен для закалки одной или нескольких впадин сразу. Закалка производится непрерывно-последовательным способом при движении индуктора вдоль образующей шестерни (рис. 30).

Если частота тока слишком высока, то боковые поверхности зубьев сильно перегреваются. Перегрев ликвидируется установкой против этих мест медных экранов, закрывающих соответствующие части магнитной цепи. Указанная мера, однако, ведет к понижению к. п. д., так как экраны поглощают часть энергии, нагреваясь индуктированными в них токами. Такую закалку можно с успехом осуществить с более высоким к. п. д. способом одновременного нагрева с помощью индуктора, схема которого приведена на рис. 31 [2]. В закалываемой впадине помещены один над другим два индуктирующих провода, токи в которых равны и направлены одинаково, так как провода соединены последова-

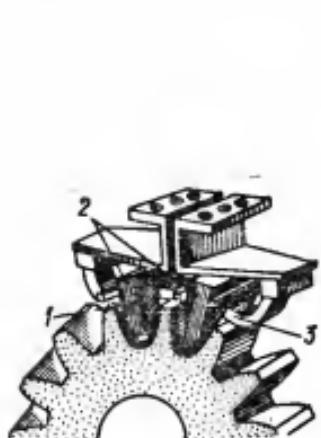


Рис. 30. Индуктор для закалки боковых поверхностей и впадин двух зубьев шестерни большого модуля непрерывно-последовательным способом:

1 — водоохлаждаемые экраны, предохраняющие боковые поверхности зубьев от перегрева; 2 — магнитопровод; 3 — индуктирующий провод

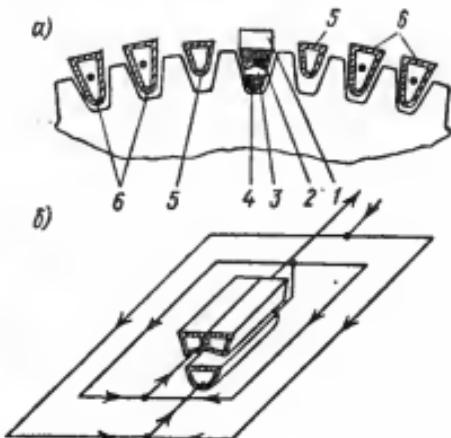


Рис. 31. Индуктор для нагрева впадин шестерен среднего модуля одновременным способом: а — расположение проводов; б — схема соединения индуктора:

1 — магнитопровод; 2 — виток индуктирующего провода; 3 — промежуточный магнитопровод; 4 — виток индуктирующего провода; 5 — дополнительные душевые устройства для охлаждения ранее закаленных поверхностей зуба; 6 — обратные провода индуктора

тельно. Обратные провода распределены симметрично по четырем впадинам, причем две впадины, соседние с нагреваемой, пронумеруются. Индуктированный в нагреваемой впадине ток вследствие эффекта близости замыкается главным образом через впадины, в которые помещены обратные провода. Благодаря этому нагрев соседних впадин в 12—16 раз слабее, чем закалываемой. Через промежуточный магнитопровод, помещенный между индуктирующими проводами, проходит лишь незначительный поток рассеяния, что, однако, оказывает сильное влияние на распределение тока в них и на характер нагрева.

В соседних с нагреваемой впадиной помещены душевые устройства, охлаждающие противоположные поверхности зубьев, с тем чтобы избежать их отпуска. Индуктор применяется для закалки шестерен с модулями 5—10 мм. Наиболее удобно применять частоту тока 8000 Гц, однако для шестерен с модулем 9—10 мм может быть использована и частота 2500 Гц.

## 11. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ

Электромагнитное экранирование применяется, если необходимо защитить от нагрева участки детали, расположенные около индуктора. Этот случай наблюдается, например, при закалке кулачковых валов с близко расположенным друг к другу кулачками (рис. 32).

Наилучшие результаты дает экранирование с помощью магнитных цепей, принудительно концентрирующих магнитное поле в узкой зоне. Магнитные цепи располагаются по обе стороны индуктора. Они могут выполнять вследствие кратковременности нагрева из сплошных стальных пластин с прорезями, увеличивающими сопротивление по пути прохождения индуцированного тока и в отдельных местах прерывающими этот путь. Глубина прорезей должна быть больше горячей глубины проникновения тока в сталь  $\Delta_k$ , а ширина выступов не должна превышать  $0,3\Delta_k$ . Хотя потери энергии в таких магнитопроводах большие, чем в магнитопроводах из электротехнической стали, они часто применяются, так как удобны в конструктивном выполнении.

Для ослабления поля рассеяния с внешней стороны магнитопроводов устанавливаются дополнительные медные экраны. Магнитопроводы и экран изолированы друг от друга и от индуктора. Иногда применяется конструкция с одними медными экранами, но в последнем случае равномерность закалки по ширине зависит от точности установки индуктора. При осевом смещении индуктора край детали, расположенный близко к экрану, нагревается значительно слабее. Это объясняется размагничивающими действиями токов, индуцированных в экране, в результате чего ослабляется не только внешнее поле, но и поле внутри индуктора.

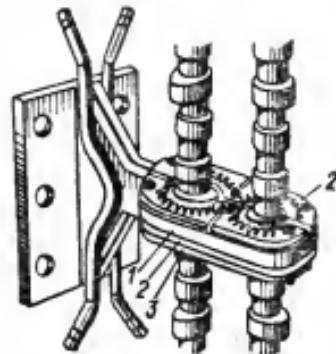


Рис. 32. Индуктор для закалки кулачков на двух распределительных валах

1—индуктирующий провод; 2—магнитопровод с радиальными прорезями, состоящий из двух половин для предотвращения замыкания индуцированного тока по его контуру; 3—médный экран

## IV. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА

### 12. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Индукторы для сквозного нагрева обычно выполняются многовитковыми на полное напряжение генератора. Так как основной задачей процесса является достижение равномерного нагрева заготовки по всему сечению с перепадом температуры, не превышающим 100—150 °С, то в отличие от поверхност-

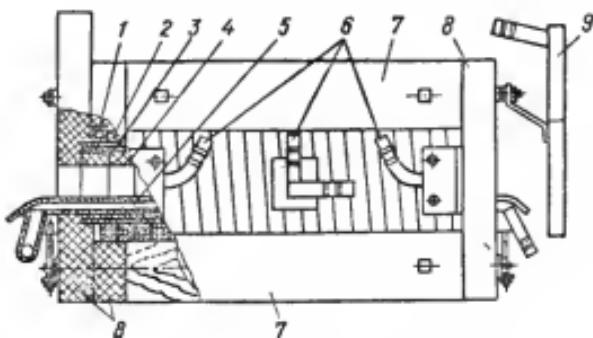


Рис. 33. Индуктор для сквозного нагрева цилиндрических мерных заготовок;

1—обмотка индуктора; 2—магнезитовая гильза; 3—асбестовая гильза; 4—шамотная изоляция; 5—направляющие; 6—штуцеры для подвода охлаждающей воды; 7—деревянные стягивающие брусья; 8—фасадные асбосцементные плиты; 9—экспандирирующий виток

ной закалки нагрев продолжается десятки и сотни секунд в зависимости от размеров сечения заготовки. В связи с длительностью нагрева полезные удельные мощности малы и обычно находятся в пределах 0,2—0,06 кВт/см<sup>2</sup>. Вследствие того, что температура поверхности достигает при этом 1200—1250 °С, потери на излучение и конвекцию оказываются сравнимы с полезной мощностью, и чтобы уменьшить их, в индукторах помещается тепловая изоляция.

Характерная конструкция индуктора для нагрева цилиндрических мерных заготовок приведена на рис. 33.

Индуктирующий провод индуктора состоит из водоохлаждаемой профилированной медной трубы, толщину стенки которой желательно выбирать равной или большей глубины проникновения тока в медь по возможности в соответствии с формулой (9).

Витки изолируются друг от друга обмоткой из лакоткани или киперной ленты, которая пропитывается бакелитовым лаком и запекается в термостате или лучше всего из стеклоленты. Толщина изоляции 1,5—2 мм. Индуктирующий провод для придания ему жесткости зажимается между двумя деревянными брусками. Концы брусков с помощью латунных сухарей и шпилек притянуты к шиферасbestosвым плитам толщиной 25—40 мм. К концам индуктора припаяны контактные пластины для присоединения к токоподводящим шинам. К виткам индуктора прилегает микармитовая гильза толщиной 1,5—2 мм, служащая для электрической изоляции, в которую устанавливается асбестовая гильза толщиной 2,5—3 мм. В асбестовой гильзе уложена основная тепловая изоляция, состоящая из шамотных колец или полуколец шириной 100—150 мм, изготовленных из шамотной массы с обжигом при 1300—1600 °C. Толщина колец обычно составляет 10—25 мм. Применение в качестве футеровки цельных шамотных труб недопустимо, так как они быстро трескаются и разрушаются. Для защиты футеровки от механического воздействия заготовок в индукторной части индуктора проложена водоохлаждаемая направляющая, сваренная из коробчатой и плоской или вогнутой полос жароупорной немагнитной стали. Полоса, на которой лежат заготовки, имеет толщину 3—4 мм. Толщина коробчатой части составляет 1,5—2,0 мм.

Часто у конца индуктора, обращенного к загрузочному приспособлению, устанавливается с помощью изолированных шпилек короткозамкнутое экранирующее кольцо из охлаждаемой водой медной трубы. В этом кольце индуктируется ток, поле которого ослабляет основное поле индуктора, чем предотвращается нагрев близко расположенных металлических частей загрузочного приспособления.

В индукторах, предназначенных для нагрева заготовок с диаметрами до 75—80 мм, устанавливается одна направляющая, при больших диаметрах — две-три, иногда до пяти. Если число направляющих превышает одну, то они часто делаются из цилиндрической трубы (рис. 34).

В настоящее время довольно часто тепловая изоляция осуществляется путем заливки индуктирующего провода, внутри и снаружи жаростойким бетоном. Перед заливкой индуктирующий провод изолируется стеклолентой, пропитанной кремнийорганическим лаком.

Для заливки применяются специальные формы. После затвердевания бетона все части индуктора оказываются прочно связанными и никаких дополнительных конструктивных элементов крепления не требуется.

Индукторы с тепловой изоляцией из жаростойкого бетона сравнительно просты в изготовлении и надежны в эксплуатации. Однако ремонт их затруднителен. При увеличении длины индуктора возрастают трудности, связанные с изготовлением форм, заполнением их бетоном и разборкой после заливки. Поэтому, если длина индуктора должна быть больше 1 м, его изготавливают из отдельных секций.

Толщина тепловой изоляции из бетона должна быть больше, чем шамотной, так как теплопроводность бетона больше, чем

шамота в 1,2—1,5 раза. Это несколько понижает электрический к. п. д. индуктора. Поэтому иногда применяется комбинированная изоляция. Тогда толщина бетона на внутренней стороне определяется механической прочностью конструкции и составляет 2—3 мм. Внутрь вставляются шамотные кольца, являющиеся основной тепловой изоляцией. Ремонт таких индукторов проще и электрический к. п. д. выше<sup>1</sup>.

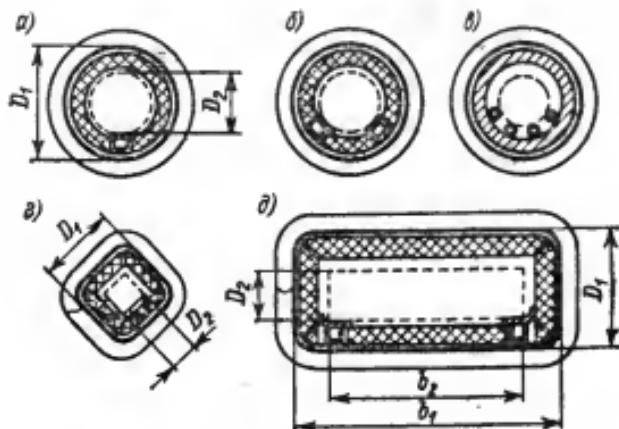


Рис. 34. Варианты конструкций и расположения направляющих: *а* — индуктор для нагрева цилиндрических заготовок с диаметрами до 80 мм; *б* — то же, но с диаметрами больше 80 мм; *в* — индуктор для нагрева цилиндрических заготовок с трубчатыми цилиндрическими направляющими; *г* — индуктор для нагрева заготовок с квадратным поперечным сечением; *д* — индуктор для нагрева заготовок с прямоугольным поперечным сечением. (Буквенные обозначения приведены в расчетах)

Индукторы могут быть периодического и методического действия. В первом случае заготовки нагреваются в индукторе по одной от исходной температуры до заданной, после чего происходит их смена. По мере повышения температуры заготовки меняется удельное сопротивление ее материала, причем у большинства металлов и сплавов оно возрастает. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов по достижении точки магнитных превращений падает до значения магнитной проницаемости вакуума (металл становится парамагнитным). Вследствие этого потребление энергии заготовкой в процессе нагрева оказывается непостоянным (рис. 35), так же как и загрузка генератора<sup>2</sup>. Это обстоятельство является недостатком индуктора периодического действия. В индукторе методического действия несколько отно-

<sup>1</sup> См. Библиотечку, вып. 8. См. также [8].  
<sup>2</sup> См. Библиотечку, вып. 1.

сительно коротких заготовок размещаются одна за другой. По мере нагрева они выталкиваются по одной и заменяются холодными. Таким образом, в процессе нагрева каждая заготовка перемещается через определенные заданные промежутки времени  $t_0$  на длину одной заготовки и проходит через весь индуктор. Время  $t_0$  обычно называют темпом выдачи. С полным временем нагрева оно связано соотношением

$$t_k = n t_0,$$

где  $n$  — число заготовок в индукторе.

Так же и в этом случае заготовки, находящиеся у выходного конца индуктора и нагретые выше точки магнитных превращений, потребляют мощность, меньшую, чем находящиеся в ферромагнитном состоянии, расположенные со стороны загрузки. Однако полная мощность, а следовательно, и нагрузка генератора остаются постоянными, если не учитывать кратковременного переходного режима, сопровождающего перемещение заготовок.

Индукторы для нагрева заготовок квадратного и прямоугольного поперечного сечения осуществляются подобным же образом (см. рис. 34).

Индукторы для непрерывно-последовательного нагрева длинных прутков выполняются без направляющих полос и экранирующих витков.

Режим работы обычного индуктора методического действия с равномерно распределенными по всей его длине витками характеризуется непрерывным ростом температуры поверхности заготовки до самого конца нагрева, когда она выталкивается из индуктора (рис. 36, а).

Распределения температуры даны перед началом передвижения заготовок.

Сократить время нагрева  $t_k$ , а следовательно, повысить производительность при той же длине индуктора или уменьшить его длину при прежней производительности можно, выполнив индуктор с переменным шагом витков, увеличивающимся к его разгрузочному концу. Так как по всем виткам идет один и тот же ток, то напряженность магнитного поля, а следовательно, и удельная мощность в начале индуктора будут максимальными.

Температура поверхности заготовок поднимется до конечного значения на протяжении 10—30% общего времени нагрева, т. е. на участке индуктора, составляющем ту же долю от его общей длины, и дальше почти не будет меняться (рис. 36, б), что обеспечит более быстрый прогрев глубинных слоев. Такой режим нагрева получил название «ускоренного».

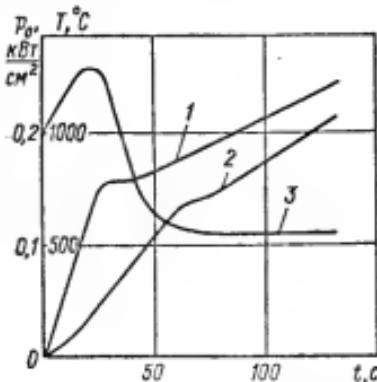


Рис. 35. Зависимость мощности, потребляемой стальной заготовкой, и ее температуры от времени нагрева:

1 — температура поверхности; 2 — температура на оси; 3 — потребляемая мощность

В практически выполняемых конструкциях шаг намотки индуктора меняется ступенчато. Число ступеней не превышает четырех, а наиболее часто ограничиваются тремя. В остальном конструкция индуктора с неравномерным шагом не отличается от описанной ранее.

Выбор основных размеров индукторов. Полный к. п. д. индуктора выражается соотношением

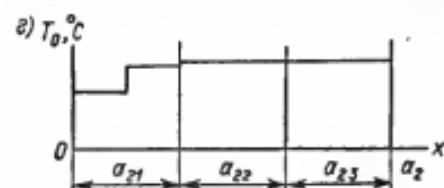
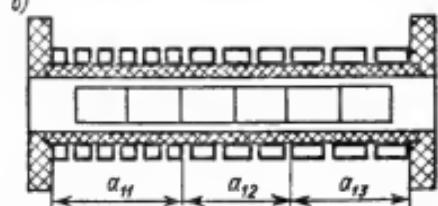
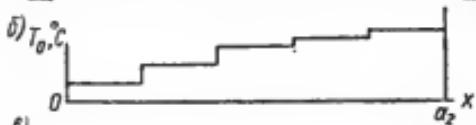
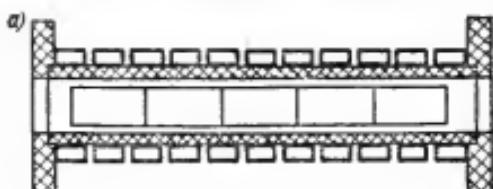


Рис. 36. Индукторы методического действия: а — схема индуктора с постоянным шагом витков; б — распределение температуры вдоль столба заготовок; в — схема индуктора со ступенчатым изменением шага витков (ускоренный нагрев); г — распределение температуры вдоль столба заготовок

Опыт и расчет показывают, что максимальный полный к. п. д. достигается при соблюдении соотношения

$$D_1/D_2 = 1, 3 \dots 2 \quad (23)$$

для цилиндрических индукторов и индукторов с квадратным поперечным сечением. Применимельно к индукторам для нагрева заготовок с прямоугольным поперечным сечением верхний предел в формуле (23) может быть увеличен до трех. В этом случае  $D_2$  — наименьший размер поперечного сечения заготовки (см. рис. 34).

где  $\eta_s$  — электрический к. п. д. индуктора;  $\eta_t$  — термический к. п. д.

Электрический к. п. д. индуктора

$$\eta_s = P_2/P_n = \\ = P_2/(P_2 + \Delta P_n).$$

где  $P_2$  — полная мощность в заготовке;  $\Delta P_n$  — потери в индуктирующем проводе;  $P_n$  — полная мощность, подведенная к индуктору.

Термический к. п. д.

$$\eta_t = P_T/P_2 = \\ = P_T/(P_T + \Delta P_T),$$

где  $P_T$  — средняя за цикл нагрева полезная мощность в заготовке;  $\Delta P_T$  — тепловые потери в окружающую среду.

Электрический к. п. д. с увеличением зазора падает, в то время как термический растет, если зазор заполняется тепловой изоляцией.

Мощность тепловых потерь для цилиндрических индукторов с шамотной изоляцией может быть подсчитана по формуле

$$\Delta P_T = 3,74 \cdot 10^{-2} \frac{a_1}{\lg (D_1/D_3)} \text{ кВт}, \quad (24)$$

где  $a_1$  — длина индуктора, см;  $D_3$  — внутренний диаметр тепловой изоляции.

Для индукторов с квадратным и прямоугольным поперечным сечением имеем

$$\Delta P_T = 1,33 \cdot 10^{-2} a_1 F_{iz} / d_{iz} \text{ кВт}, \quad (25)$$

где  $F_{iz}$  — средний периметр теплонизоляции (в поперечном сечении), см;  $d_{iz}$  — толщина теплонизоляции, см.

Размер  $D_3$  выбирается из следующих соотношений:

$$D_3 = (1,1 \dots 1,2) D_2; \quad D_3 - D_2 \geq 1 \text{ см}. \quad (26)$$

Опытным путем установлено, что равномерный нагрев заготовок по всей длине обеспечивается, если длина индуктора удовлетворяет соотношению

$$a_1 = a_2 + (1 \dots 2) D_1, \quad (27)$$

где  $a_2$  — длина заготовки.

Для индуктора методического действия, в котором находится заготовка каждой длиной  $a_2'$ , имеем:

$$a_2 = n a_2'; \quad (28)$$

$$n = t_{iz}/t_0. \quad (29)$$

**Выбор частоты.** Необходимо соблюдение двух условий: 1) электрический к. п. д. индуктора не должен сильно отличаться от предельного<sup>1</sup>, это условие определяет нижний предел частоты; 2). время нагрева должно быть минимальным (с уменьшением времени нагрева резко снижается рост окалины и увеличивается производительность). Это условие определит верхний предел частоты.

Наибольшая глубина проникновения тока соответствует прогреву стального тела выше точки магнитных превращений, когда  $\mu_{\text{стн}} = 1$  и  $\rho_2 = 10^{-4}$  Ом·м. Если в этом случае поверхностный эффект будет выражен достаточно резко, то высокий электрический к. п. д. индуктора будет высоким на протяжении всего цикла нагрева.

На основании приведенных соображений нижний предел частоты определится неравенством [7]

$$f > F_0 10^4 / D_2^2 \text{ Гц}, \quad (30)$$

где  $D_2$  — диаметр цилиндра или толщина прямоугольного тела, см. Коэффициент  $F_0$  зависит от соотношений размеров нагреваемого тела и индуктора.

<sup>1</sup> См. Библиотечку, вып. 1.

Ниже приведены значения  $F_0$  (вычисленные при условии  $D_1/D_2 = 1,5 \dots 2,5$ ,  $\rho_2 = 10^{-4}$  Ом·м,  $\mu_{\text{отн}} = 1$ ) для случая нагрева стального цилиндра при разных значениях  $D_2/a_2$ :

$D_2/a_2$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$F_0$	3	5,6	8,3	11,3	15,3	19

При нагреве тела с прямоугольным поперечным сечением значения коэффициента  $F_0$  при  $D_1/D_2 = 1,5 \dots 3$  приведены в табл. 1.

### 1. Значения коэффициента $F_0$ для определения нижнего предела частоты при нагреве стальной пластинки

$D_2/a_2$	$D_2/b_2$				
	0	0,1	0,2	0,5	1,0
0,00	1,0	1,0	1,0	1,8	3,0
0,10	1,0	1,1	1,2	2,4	5,0
0,25	1,1	1,4	1,6	3,3	8,0
0,50	1,5	2,1	2,5	4,8	13,0
1,00	2,3	3,3	4,9	14,0	25,0

Причина.  $a_2$  — длина;  $b_2$  — ширина;  $D_2$  — толщина пластины

Для немагнитных материалов, у которых  $\rho_2 \neq 10^{-4}$  Ом·см, следует вместо  $F_0$  подставлять коэффициент

$$F = 10^4 F_0 \rho_2,$$

где  $\rho_2$  — удельное сопротивление нагреваемого материала, Ом·см.

Верхний предел частоты при нагреве стального цилиндра или пластины до температуры, превышающей точку магнитных превращений, определяется соотношением

$$f < 6 \cdot 10^4 / D_2^2 \text{ Гц.} \quad (31)$$

Для других материалов получим

$$f < 6 \cdot 10^8 \rho_2 / D_2^2 \text{ Гц.} \quad (32)$$

Очевидно, что верхний предел частоты имеет смысл только при  $F_0 < 6$ . Если  $F_0 > 6$ , то используется лишь нижний предел частоты.

При сквозном нагреве труб [7] из немагнитного материала может быть выделена полоса оптимальных частот, в пределах которой электрический к. п. д. индуктора имеет максимальное значение, а прогрев наиболее равномерен

$$4 \cdot 10^7 \rho_2 / (D_{2\text{ср}} d_2 k_2) < f < 10 \cdot 10^7 \rho_2 / (D_{2\text{ср}} d_2 k_2),$$

где  $D_{2\text{ср}}$  — средний диаметр трубы, см;  $d_2$  — толщина стенки трубы, см;  $k_2 = k = f(D_{2\text{ср}}/a)$  — вычисляется по формуле (45). Приведенной формулой можно пользоваться, если  $D_{2\text{ср}}/a \leq 1$ .

Определение времени нагрева и средней мощности, подведенной к заготовке. Время нагрева заготовки определяется заданным перепадом температуры  $\Delta T$  между ее поверхностью и серединой сечения. Это время зависит от частоты тока, размеров и формы сечения, свойств материала, абсолютного значения температуры поверхности, а также от особенностей режима нагрева.

Ниже приведены полуэмпирические соотношения для определения времени нагрева цилиндрических и прямоугольных стальных заготовок, нагреваемых до 1200—1300 °C при  $\Delta T = 100 \dots 150$  °C для обычного способа нагрева в индукторах с постоянным шагом витков, а также для ускоренного при  $\Delta T = 100$  °C. Первый режим для краткости мы в дальнейшем будем называть «обычным».

Во всех упомянутых случаях время нагрева может быть выражено формулой

$$t_k = K D_2'^2, \quad (33)$$

где  $K$  — коэффициент, значения которого приведены в табл. 2;  $D_2'$  — приведенный диаметр для цилиндрической и наименьший размер сечения для прямоугольной заготовок;

$$D_2' = D_2 - \xi, \quad (34)$$

где  $\xi$  — глубина слоя, в котором выделяется главная часть энергии индуцированного тока;  $\xi = \Delta_k$  при  $D_2/\Delta_k \geq 5$ ;  $\xi = 0,2D_2$  при  $D_2/\Delta_k < 5$  — для цилиндра;  $\xi = 0,22D_2$  при  $D_2/\Delta_k < 5$  — для широкой пластины.

## 2. Значения коэффициента $K$

Деталь	$\Delta T, °C$	$K$ при нагреве	
		обычном	ускоренном
Цилиндр	100	6	2,5
	150	3,7	—
Пластина	100	11,7	5,3
	150	6,9	—

Для квадратной заготовки вместо  $D_2$  подставляется эквивалентный диаметр

$$D_{2s} = 2D_2/\sqrt{\pi}.$$

Значения коэффициента  $K$  для пластин действительны для  $b_2/D_2 \geq 5$ . Далее он почти линейно приближается к значению  $K$  для цилиндра.

Глубина проникновения тока  $\Delta_k$  определяется по усредненным значениям удельного сопротивления.

При нагреве до температуры на поверхности  $T_0 = 1200 \dots 1300$  °C среднее значение удельного сопротивления в

интервале температур 750—1250 °С принимается равным  $1,24 \cdot 10^{-4}$  Ом·см.

Тогда

$$\Delta_k = 56/\sqrt{f} \text{ см.} \quad (35)$$

Средняя полезная мощность вычисляется по теплосодержанию заготовки и известному времени нагрева

$$P_T = 840G/t_k \text{ кВт,} \quad (36)$$

где  $G$  — масса заготовки, кг.

### 13. РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА МЕРНЫХ ЗАГОТОВОК

**Индукторы периодического действия.** Как указывалось выше, мощность, подводимая к заготовке, а следовательно, и мощность, подводимая к индуктору, в течение цикла нагрева меняются вследствие изменения удельного сопротивления и магнитной проницаемости заготовки. На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно считать, что мощность  $P_{2r}$  в конце нагрева стальной заготовки до 1200—1300 °С при условии приблизительно постоянного напряжения на индукторе связана со средней мощностью  $P_{2cp}$  соотношением

$$P_{2r} \approx 0,72P_{2cp}, \quad (37)$$

где

$$P_{2cp} \approx 1,05(P_T + \Delta P_T). \quad (38)$$

Коэффициент 1,05 учитывает потери в направляющих. Зная мощность  $P_{2r}$ , можно для определения требуемого числа витков индуктора ограничиться расчетом индуктора для конца нагрева (так называемый горячий режим), когда заготовка парамагнитна ( $\mu_{\text{отн}} = 1$ ).

Ниже приведен расчет нагрева цилиндрической заготовки в индукторе периодического действия, а также приведены соответствующие формулы применительно к заготовкам прямоугольного сечения.

**Пример расчета.** Задано: частота  $f = 2500$  Гц,  $D_2 = 7,5$  см,  $a_2 = 83$  см,  $U_k = 750$  В,  $T_0 = 1250 \dots 1300$  °С,  $\Delta T = 100$  °С.

Требуется определить число витков индуктора  $w$ , мощность  $P_k$ , подводимую к индуктору, и его основные размеры  $D_1$  и  $a_1$ . Вначале расчет ведется для условного одиовиткового индуктора. Число витков, определяется в конце расчета.

1. Время нагрева  $t_k$ :

по формуле (35)

$$\Delta_k = 56/\sqrt{f} = 56/\sqrt{2500} = 1,12 \text{ см;}$$

$$D_2/\Delta_k = 6,7 > 5; \quad \xi = \Delta_k;$$

по формуле (34)

$$D'_2 = D_2 - \xi = 7,5 - 1,12 = 6,38 \text{ см;}$$

по формуле (33)

$$t_k = K D_2'^2 = 6 \cdot 6,38^2 = 244 \text{ с}$$

(значение  $K$  см. в табл. 2).

2. Средняя полезная мощность:

по формуле (36)

$$P_T = 840 \text{ Гт} / t_k = 840 \cdot 28,4 / 244 = 97,8 \text{ кВт};$$

$$G = \pi D_2^2 a_2 \gamma 10^{-3} / 4 = \pi 7,5^2 \cdot 83 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} / 4 = 28,4 \text{ кг.}$$

3. Внутренний диаметр индуктора и толщина тепловой изоляции.

На основании соотношения (23) выбираем

$$D_1 = 1,6, D_2 = 1,6 \cdot 7,5 = 12 \text{ см}; D_3 = D_2 = 1 \text{ см},$$

откуда  $D_3 = 8,5 \text{ см.}$

Для прямоугольной заготовки

$$D_1 = (1,3 \dots 3) D_2.$$

4. Длина индуктора:

по формуле (27)

$$a_1 = a_2 + (1 \dots 2) D_1 = 83 + 1,4 \cdot 12 = 100 \text{ см.}$$

5. Тепловые потери:

по формуле (24)

$$\Delta P_T = 3,74 \cdot 10^{-2} a_1 / \lg(D_1 / D_3) = 3,74 \cdot 10^{-2} \cdot 100 / 0,15 = 25 \text{ кВт.}$$

Для заготовок с прямоугольным и квадратным сечением по формуле (25)

$$\Delta P_T = 1,33 \cdot 10^{-2} a_1 F_{ns} / d_{ns} \text{ кВт.}$$

6. Средняя мощность в заготовках:

по формуле (38)

$$P_{2cp} = 1,05 (P_T + \Delta P_T) = 1,05 (97,8 + 25) = 129 \text{ кВт.}$$

7. Мощность в конце нагрева:

по формуле (37)

$$P_{2r} = 0,72 P_{2cp} = 0,72 \cdot 129 = 93 \text{ кВт.}$$

8. Активное  $r_2$  и внутреннее реактивное  $x_{2m}$  сопротивления заготовки:

$$m_2 = D_2 / (\sqrt{2} \Delta_R) = 7,5 / (\sqrt{2} \cdot 1,12) = 4,73;$$

$$A = f(m_2) = 0,25; B = f(m_2) = 0,3 \text{ (табл. 3);}$$

$$\text{при } m_2 > 6 \quad A \approx B \approx \sqrt{2} / m_2;$$

$$r_2 = \pi \rho_2 m_2^2 A / a_2 = \pi 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 4,73^2 \cdot 0,25 / 83 = 2,63 \cdot 10^{-5} \text{ Ом; (39)}$$

$$x_{2m} = \pi \rho_2 m_2^2 B / a_2 = \pi 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 4,73^2 \cdot 0,3 / 83 = 3,15 \cdot 10^{-5} \text{ Ом. (40)}$$

При расчете сопротивлений полых цилиндров с толщиной стенки  $d_2 > 1,5 \Delta_2$  можно с ошибкой, не превышающей 10% для  $r_2$  и менее 2% для  $x_{2m}$ , пользоваться данными табл. 3. Общий случай этого расчета рассмотрен в [6; 7].

При расчете  $r_2$  и  $x_{2m}$  заготовок с прямоугольной формой сечения следует пользоваться соотношениями [4; 7]:

$$r_2 = 2 (D_2 + b_2) \rho_2 G / (a_2 \Delta_2);$$

$$x_{2m} = 2 (D_2 + b_2) \rho_2 Q / (a_2 \Delta_2),$$

где  $G$  и  $Q$  — функции отношений  $D_2 / \Delta_2$  и  $b_2 / D_2$ ; их значения приведены на рис. 37 и 38.

3. Значения расчетных коэффициентов  $A$

$m_2$	$A$	$B$	$m_2$	$A$	$B$	$m_2$	$A$	$B$
0,0	0,00	1,00	3,0	0,36	0,5	10	0,130	0,140
0,5	0,03	0,99	3,5	0,33	0,41	15	0,090	0,090
1,0	0,12	0,98	4,0	0,29	0,36	20	0,071	0,071
1,5	0,25	0,91	5,0	0,24	0,28	25	0,057	0,057
2,0	0,34	0,77	6,0	0,21	0,24	30	0,047	0,047
2,5	0,38	0,62	8,0	0,16	0,18	40	0,035	0,035

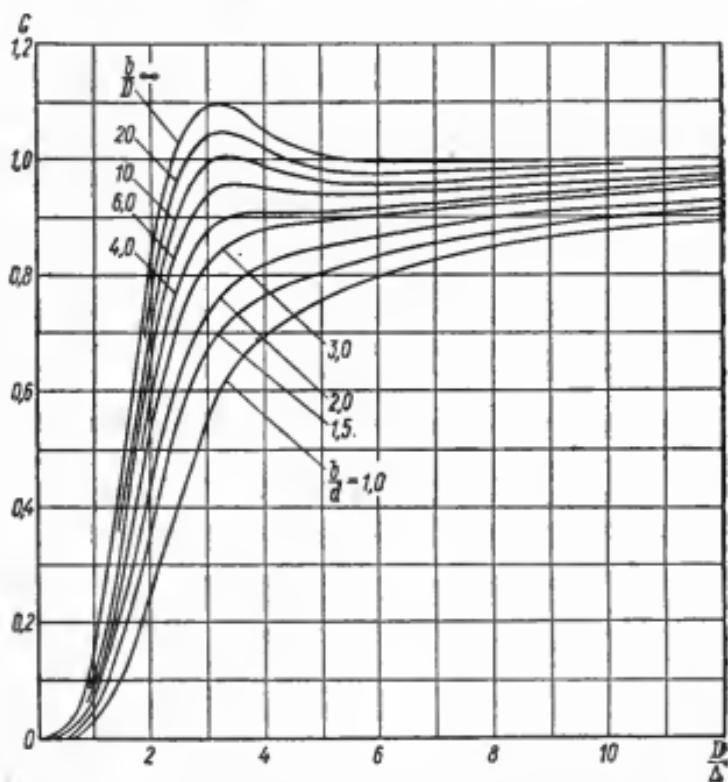


Рис. 37. График функции  $G$  для вычисления активного  $r_2$  сопротивления заготовки с прямоугольным поперечным сечением

### 9. Реактивность рассеяния индуктора

$$x_S = 7,9 \cdot 10^{-8} j S_h / a_2, \quad (41)$$

где  $S_h$  — площадь зазора между заготовкой и индуктирующим проводом,  $\text{см}^2$ ;  $x_S = 7,9 \cdot 10^{-8} \cdot 2500\pi (12^2 - 7,5^2) / (4 \cdot 83) = 16,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$ .

10. Коэффициент приведения активного сопротивления заготовки:

$$C = \frac{1}{(r_2/x_0)^2 + [1 + (x_{2m} + x_S)/x_0]^2}; \quad (42)$$

$$x_0 = ka_1 x_{10} / (a_1 - a_2 k); \quad (43)$$

$$x_{10} = 7,9 \cdot 10^{-8} / S_1 / a_1 \text{ Ом,} \quad (44)$$

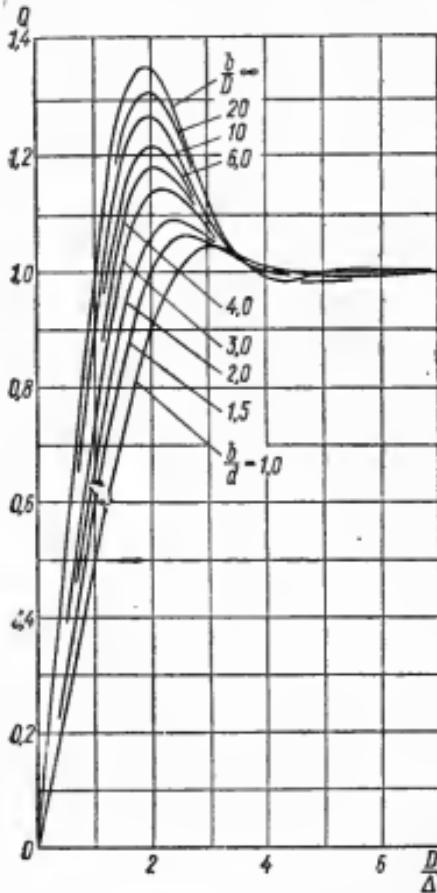


Рис. 38. График функции  $Q$  для вычисления внутреннего реактивного  $X_{2m}$  сопротивления заготовки с прямоугольным поперечным сечением

где  $S_1$  — площадь поперечного сечения индуктора в см;  $a_1$  и  $a_2$  — длина индуктора и заготовок, см;  $k = f(D_1/a_1)$  — для цилиндрических заготовок [см. формулу (45)];  $k = f(D_1/b_1; D_1/a_1)$  — для заготовок прямоугольного и квадратного сечения (рис. 39).

Для цилиндрических заготовок имеем:

$$k = \frac{2,3}{2,3 + D_1/a_1}; \quad (45)$$

$$x_{10} = 7,9 \cdot 10^{-8} \cdot 2500\pi 12^2 / (4 \cdot 100) = 22,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$D_1/a_1 = 0,12; \quad k = 0,951;$$

$$x_0 = 0,951 \cdot 100 \cdot 22,4 \cdot 10^{-5} / (100 - 83 \cdot 0,951) = 101 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$C = \frac{1}{(2,63/101)^2 + [1 + (3,15 + 16,4)/101]^2} = 0,705.$$

11. Приведенное активное  $r'_2$  и реактивное  $x'_2$  сопротивления заготовки:

$$r'_2 = Cr_2 = 0,705 \cdot 2,63 \cdot 10^{-5} = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x'_2 = C \left[ x_S + x_{2M} + \frac{(x_S + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right] = \\ = 0,705 \left[ 19,55 + \frac{(19,55^2 + 2,63^2)}{101} \right] 10^{-5} = 16,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

12. Активное  $r_1$  и внутреннее реактивное  $x_{1M}$  сопротивления индуктирующего провода.

Обычно  $d_1 > \Delta_1$ . Тогда

$$r_1 \approx x_{1M} \approx \pi D_1 \rho_1 / (a_1 g \Delta_1), \quad (46)$$

где  $\rho_1 \approx 2 \cdot 10^{-8}$  Ом·см — удельное сопротивление меди;  $\Delta_1$  — глубина проникновения тока в медь [формула (8)];  $g$  — коэффициент заполнения индуктора медью по высоте ( $g = 0,85 \dots 0,9$ );

$$r_1 = x_{1M} = \pi 12 \cdot 2 \cdot 10^{-6} / (100 \cdot 0,85 \cdot 0,14) = 6,34 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Применимально к овальным индукторам вместо  $\pi D_1$  в формулу (46) подставляется внутренний периметр витка индуктора, равный  $2(D_1 + b_1)$ .

13. Эквивалентные активное  $r_n$ , реактивное  $x_n$  и полное  $z_n$  сопротивления индуктора:

$$r_n = r_1 + r'_2 = 0,63 \cdot 10^{-5} + 1,85 \cdot 10^{-5} = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_n = x_{1M} + x'_2 = 0,63 \cdot 10^{-5} + 16,5 \cdot 10^{-5} = 17,13 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$z_n = \sqrt{x_n^2 + r_n^2} = \sqrt{17,13^2 + 2,48^2} \cdot 10^{-5} = 17,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

14. Электрический к. п. д. индуктора

$$\eta_s = P_{2r} / P_{n, r} = r'_2 / r_n = 1,85 / 2,48 = 0,746.$$

15. Мощность, подводимая к индуктору в конце нагрева,

$$P_{\text{и. г}} = P_{2\Gamma} / \eta_3 = 93 / 0,746 = 125 \text{ кВт.}$$

16. Коэффициент мощности индуктора в конце нагрева

$$\cos \varphi_{\text{и. г}} = r_{\text{и}} / z_{\text{и}} = 2,48 / 17,3 = 0,143.$$

17. Ток в одиовитковом индукторе

$$I'_{\text{и}} = \sqrt{P_{2\Gamma} 10^3 / r'_2} = \sqrt{93 \cdot 10^3 / (1,85 \cdot 10^{-5})} = 7,09 \cdot 10^4 \text{ А.}$$

18. Напряжение на одиовитковом индукторе

$$U'_{\text{и}} = I'_{\text{и}} z_{\text{и}} = 7,09 \cdot 10^4 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} = 12,25 \text{ В.}$$

19. Число витков индуктора

$$w = U_{\text{и}} / U'_{\text{и}} = 750 / 12,25 \approx 61.$$

20. Плотность тока в индукторе

$$\delta_{\text{и}} = I'_{\text{и}} 10^{-2} / (a_1 \Delta_1 g) = 7,09 \cdot 10^4 \cdot 10^{-2} / (100 \cdot 0,14 \cdot 0,85) \approx 64 \text{ А/мм}^2,$$

что допустимо ( $\delta_{\text{и}} < 150 \text{ А/мм}^2$ ).

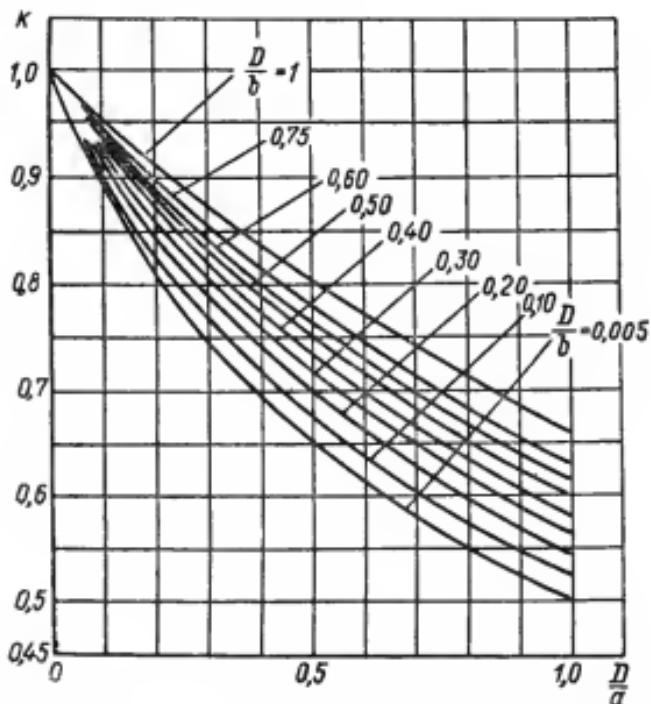


Рис. 39. Поправочный коэффициент для вычисления индуктивности прямоугольного соленоида

## 21. Размеры трубы индуктирующего провода

$$b = a_1 g / (w + 1) = 100 \cdot 0,85 / 62 \approx 1,2 \text{ см.}$$

Выбираем трубку  $(12 \times 10) / (8 \times 6)$  мм.

22. Полные потери в индукторе. Полные потери в индукторе, вызывающие его нагрев, складываются из потерь  $\Delta P_n = I_{n1}^2 r_1 = = P_n - P_2$  и тепловых потерь  $\Delta P_T$  через тепловую изоляцию, воспринимаемых индуктирующим проводом,

$$\Delta P_n = P_n - P_2 = 125 - 93 = 32 \text{ кВт};$$

$$\Delta P = \Delta P_n + \Delta P_T = 33 + 25 = 57 \text{ кВт};$$

23. Расход охлаждающей воды. Считая допустимой разность температур, входящей в индуктор и выходящей из него  $\Delta T = = 30^\circ\text{C}$ , имеем

$$W = 0,24 \Delta P / \Delta T_b = 0,24 \cdot 57 / 30 = 0,456 \text{ л/с.}$$

## 24. Скорость воды

$$v = W 10^{-3} / s = 0,456 \cdot 10^{-3} / (0,008 \cdot 0,006) = 9,5 \text{ м/с,}$$

где  $s$  — площадь отверстия трубы,  $\text{м}^2$ .

## 25. Проверка на турбулентность.

Гидравлический диаметр

$$D_0 = 4s/F = 4 \cdot 0,48 \cdot 10^{-4} / [2(0,8 + 0,6) 10^{-2}] = 0,685 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

где  $F$  — охлаждаемый периметр трубы, м.

Критерий Рейнольда

$$Re = v D_0 / (0,66 \cdot 10^{-6}) = 9,5 \cdot 0,685 \cdot 10^{-2} / (0,66 \cdot 10^{-6}) \approx 10^5 > 2300,$$

т. е. движение турбулентное, так как  $Re > 2300$ .

## 26. Перепад давления в трубке индуктора.

Коэффициент сопротивления при шероховатости 2-го рода

$$\lambda_1 = 10^{-2} (5/D_0)^{0,314} = 10^{-2} (5 \cdot 10^2 / 0,685)^{0,314} = 0,0795.$$

Длина трубы индуктора:

$$l_n = \pi D_1 w = \pi 12 \cdot 61 \cdot 10^{-2} = 23 \text{ м;}$$

$$\Delta p = \lambda_1 v^2 l_n 10^{-2} / (2 D_0) =$$

$$= 7,95 \cdot 10^{-2} \cdot 9,5^2 \cdot 23 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 0,685 \cdot 10^{-2}) = 120,5 \text{ кгс/см}^2,$$

что недопустимо много. Если индуктор питается от городского водопровода, то перепад давления должен быть меньше 2 кгс/см<sup>2</sup>. Для этого охлаждение индуктора нужно разделить на четыре ветви. Тогда перепад давления будет

$$\Delta p_n = \Delta p / n^3 = 120,5 / 64 = 1,88 \text{ кгс/см}^2,$$

что допустимо. В приведенной формуле  $n$  — число ветвей охлаждения.

Индукторы периодического действия, нагрев заготовок переменного сечения. В этом случае, например, при ступенчатом из-

менении диаметра (рис. 40), необходимо обеспечить на каждом участке выделение различной энергии при одном и том же времени нагрева. Это достигается соответствующим распределением напряженности магнитного поля по участкам, для чего индуктор выполняется с переменным шагом витков. На участке с наибольшим диаметром  $D_{21}$  шаг витков наименьший и напряженность поля наибольшая.

Ориентировочный расчет индуктора выполняется подобно расчету индуктора для нагрева гладкого цилиндра той же массы и длины, при некоторых дополнениях. Примерный ход расчета поясним на примере трехступенчатой заготовки, показанной на рис. 40.

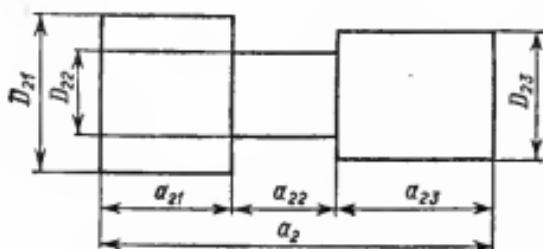


Рис. 40. Эскиз цилиндрической заготовки со ступенчатым изменением диаметра

Частота тока выбирается в соответствии с формулами (30) — (32) по наименьшему диаметру ( $D_{22}$ ) и полной длине заготовки.

Время нагрева определяется по заданному перепаду температуры  $\Delta T$  по формуле (33) по наибольшему диаметру ( $D_{21}$ ), после чего находятся полезные мощности на каждом участке и полезные удельные мощности ( $\text{kBt}/\text{см}^2$ ):

$$P_{T1} = 840G_1/t_k \text{ кВт}; \quad p_{01} = P_{T1}/(\pi D_{21} a_{21});$$

$$P_{T2} = 840G_2/t_k \text{ кВт}; \quad p_{02} = P_{T2}/(\pi D_{22} a_{22});$$

$$P_{T3} = 840G_3/t_k \text{ кВт}; \quad p_{03} = P_{T3}/(\pi D_{23} a_{23}),$$

где  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  — массы участков, кг;  $t_k$  — время нагрева, с;  $D_{21}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{23}$  — диаметры участков, см;  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{23}$  — длины участков, см.

Внутренний диаметр индуктора  $D_1$  и его длина  $a_1$  определяются по формулам (23) и (27) по наибольшему диаметру заготовки и по ее полной длине  $a_2$ , после чего по формуле (24) находятся тепловые потери  $\Delta P_T$ .

Средняя мощность, передаваемая в заготовку,

$$P_{2cp} = P_{T1} + P_{T2} + P_{T3} + \Delta P_T.$$

На первом этапе рассчитывается индуктор для нагрева эквивалентного гладкого цилиндра той же массы с диаметром

$$D_2 = 2 \sqrt{(G_1 + G_2 + G_3)/(\pi \gamma a_2)},$$

где  $\gamma$  — плотность материала заготовки,  $\text{кг}/\text{см}^3$ .

Расчет выполняется для горячего режима, как указано выше, по заданному напряжению на индукторе, в результате чего находится полное число витков  $w$ .

При нагреве заготовок из немагнитных материалов в электрический расчет подставляется мощность  $P_{2cp}$ , при нагреве стальных — мощность  $P_{2r} = 0,72P_{2cp}$ .

На втором этапе находятся распределение витков по участкам. Для этого определяются полные удельные мощности по участкам, средняя удельная мощность и средние удельные витки.

Средняя удельная мощность

$$p_{0cp} = P_{2cp}/[\pi(D_{21}a_{21} + D_{22}a_{22} + D_{23}a_{23})].$$

Средняя удельная мощность тепловых потерь

$$\Delta p_{T cp} \approx \Delta P_{T cp}/(\pi D_2 a_2).$$

Полные удельные мощности по участкам:

$$p_1 = p_{01} + \Delta p_{T cp}; \quad p_2 = p_{02} + \Delta p_{T cp}; \quad p_3 = p_{03} + \Delta p_{T cp}.$$

Средние удельные витки (вит/см)

$$w'_{cp} = w/a_1.$$

Индуктор делится на участки:

$$a_{11} = a_{21} + \Delta a; \quad a_{12} = a_{22}; \quad a_{13} = a_{23} + \Delta a,$$

где  $\Delta a = (a_1 - a_2)/2$ .

Удельные витки на участках находятся по удельным мощностям:

$$w'_1 = w'_{cp} \sqrt{p_1/p_{0cp}}; \quad w'_2 = w'_{cp} \sqrt{p_2/p_{0cp}}; \quad w'_3 = w'_{cp} \sqrt{p_3/p_{0cp}}$$

Полные числа витков на участках равны:

$$w_1 = a_{11}w'_1; \quad w_2 = a_{12}w'_2; \quad w_3 = a_{13}w'_3.$$

Числа витков округляются до целых и производится проверка

$$w_1 + w_2 + w_3 = w.$$

В заключение выбирается трубка и рассчитываются охлаждение индуктора по участкам.

Индукторы методического действия, обычный нагрев. В этом случае мощность, подводимая к индуктору, неизменна. Однако, как уже упоминалось, распределение мощности вдоль оси заготовок неравномерно. У загрузочного конца индуктора, на участке заготовок, нагретых ниже точки магнитных превращений, удельная мощность больше и далее, к разгрузочному концу, по мере прогрева заготовок она уменьшается. Также меняется и сопротивление  $r_2$  заготовок.

Так как шаг витков индуктора и ток в витках имеют неизменное значение, то напряженность поля вдоль оси не меняется. Вследствие этого изменение удельной мощности определяется изменением сопротивления  $r_2$  заготовки по мере нагрева.

Полная мощность, сообщаемая всем заготовкам, равна средней мощности за цикл нагрева, подсчитанной по формулам (36) и (38). На основе обработки результатов расчета различных режимов нагрева, а также на основе экспериментов для активного и внутреннего реактивного сопротивлений заготовок установлены усредненные соотношения:

$$r_2 = 1,6r_{2r}; \quad x_{2M} = 1,15x_{2M.r}, \quad (47)$$

где  $r_{2r}$  и  $x_{2M.r}$  — активное и внутреннее реактивное сопротивления заготовок, нагретых выше точки магнитных превращений.

Таким образом, расчет индуктора производится для горячего режима с поправками по формулам (47) на среднюю мощность.

В качестве примера приводится расчет индуктора методического действия для нагрева заготовок, размеры которых заменены из предыдущего примера, при той же частоте 2500 Гц. Так как в большей части ход расчета совпадает, то будут рассмотрены лишь пункты, в которых имеется отличие.

Пример расчета. Задано:  $f = 2500$  Гц;  $D_2 = 7,5$  см;  $a_2' = 16,6$  см; масса заготовки  $G' = 5,68$  кг;  $U_n = 750$  В;  $t_0 = 49$  с.

1.  $t_k = 244$  с — см. п. 1 предыдущего расчета; по формуле (29) число заготовок в индукторе

$$n = t_k/t_0 = 244/49 = 5;$$

общая длина заготовок

$$a_2 = na_2' = 5 \cdot 16,6 = 83 \text{ см};$$

общая масса заготовок

$$G = nG' = 5 \cdot 5,68 = 28,4 \text{ кг.}$$

Пункты 2—6 и 9 без изменения, пункт 7 исключается, пункт 8 дополняется: по формуле (47)

$$r_2 = 1,6r_{2r} = 1,6 \cdot 2,63 \cdot 10^{-5} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

$$x_{2M} = 1,15x_{2M.r} = 1,15 \cdot 3,15 \cdot 10^{-5} = 3,63 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

То же относится и к расчету заготовок с прямоугольным поперечным сечением.

$$10. \quad C = \frac{1}{(4,2/101)^2 + (1 + 20,03/101)^2} = 0,699.$$

$$11. \quad r_2' = 0,699 \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} = 2,94 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_2' = 0,699 [20,03 + (20,03^2 + 4,2^2)/101] 10^{-5} = 16,9 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Пункт 12 без изменений.

$$13. \quad r_n = 0,634 \cdot 10^{-5} + 2,94 \cdot 10^{-5} = 3,57 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_n = 0,634 \cdot 10^{-5} + 16,9 \cdot 10^{-5} \approx 17,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$z_n = \sqrt{17,5^2 + 3,57^2} 10^{-5} = 17,86 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

$$14. \eta_{\text{и}} = 2,94/3,57 = 0,824.$$

15. Мощность, подводимая к индуктору,

$$P_{\text{и}} = P_{2\text{cp}}/\eta_{\text{и}} = 129/0,815 = 157 \text{ кВт.}$$

$$16. \cos \varphi_{\text{и}} = 3,57/17,86 = 0,2.$$

$$17. I'_{\text{и}} = \sqrt{P_{2\text{cp}} 10^3 / r'_2} = \sqrt{129 \cdot 10^3 / 2,94 \cdot 10^{-5}} = 6,62 \cdot 10^4 \text{ А.}$$

$$18. U'_{\text{и}} = 6,62 \cdot 10^4 \cdot 1,786 \cdot 10^{-4} = 11,8 \text{ В.}$$

$$19. w = 750/11,8 \approx 63 \text{ витка.}$$

Расчет охлаждения индуктора (п. 20—26) производится также, как в предыдущем примере.

Индукторы методического действия, ускоренный нагрев <sup>1</sup>. Вследствие быстрого роста температуры расчет  $r_2$  и  $x_{2\text{и}}$  производится для «горячего» режима. Расчет производится следующим образом.

1. По формуле (33) по заданному перепаду температуры находится время нагрева  $t_k$  (мы будем принимать  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ ).

2. По формулам (36) и (38) определяются средние полезная и полная мощности в заготовке.

3. По заданному темпу выдачи  $t_0$  определяется число заготовок  $n$  и по формуле (27) — длина индуктора.

4. Определяется диаметр индуктора по формуле (23).

5. Производится электрический расчет индуктора на среднюю мощность, в результате которого определяется число витков  $w$  в предположении, что витки распределены равномерно.

6. Индуктор разбивается на три участка. По отношению к длине столба заготовок  $a_2$  длины участков целесообразно выбирать в пределах:

$$\left. \begin{aligned} a_{21} &= (0,2 \dots 0,3) a_2 \approx a_{22}; \\ a_{23} &= (0,4 \dots 0,6) a_2. \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Удельная полезная мощность (кВт/см<sup>2</sup>) на каждом участке определяется при условии  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$  из соотношения

$$\left. \begin{aligned} p_{01} &= 1,87/D'_2; \\ p_{02} &= 0,417/D'_2; \\ p_{03} &= 0,122/D'_2. \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

К этим удельным мощностям прибавляется удельная мощность тепловых потерь и потерь в направляющих, в результате чего получаются полные удельные мощности  $p_1$ ,  $p_2$  и  $p_3$ .

Если сумма произведений удельных мощностей на поверхность каждого из участков равна полной средней мощности, то выбор длины участков сделан правильно.

Крайние участки индуктора  $a_{11}$  и  $a_{13}$  длиннее участков  $a_{21}$  и  $a_{23}$  на  $\Delta a/2$ , где  $\Delta a = a_1 - a_2$ .

<sup>1</sup> Более подробно по этому вопросу см. [7].

7. Число витков на каждом из участков находится на основании соотношений:

$$w'_1/w'_3 = \sqrt{p_1/p_3} = a; \quad w'_2/w'_3 = \sqrt{p_2/p_3} = \beta; \quad (50)$$

$$w'_3 a_{13} + w'_3 \beta a_{12} + w'_3 \alpha a_{11} = w; \quad (51)$$

$$w'_3 = w/(a_{13} + \beta a_{12} + \alpha a_{11}), \quad (52)$$

где  $w'_1$ ,  $w'_2$ ,  $w'_3$  — число витков на 1 см длины каждого участка;  $w$  — получение раньше полное число витков индуктора.

Дальше обычным путем производится расчет охлаждения индуктора.

Рассчитаем индуктор для нагрева заготовок из предыдущего примера, но при большей производительности.

Пример расчета. Задано:  $f = 2500$  Гц;  $D_2 = 7,5$  см;  $a'_2 = 16,6$  см;  $t_0 = 25$  с;  $\Delta T = 100$  °С;  $U_n = 750$  В.

### 1. Время нагрева

$$t_k = K D_2^2 = 2,5 \cdot 6,38^2 = 101,5 \text{ с};$$

число заготовок в индукторе  $n = 101,5/25 = 4$ ;

уточненное время нагрева  $t_k = 4 \cdot 25 = 100$  с.

### 2. Средняя полезная мощность

$$P_T = 840 \cdot 5,68 \cdot 4/100 = 190 \text{ кВт.}$$

### 3. Внутренний диаметр индуктора:

$$D_1 = 1,6 D_2 = 1,6 \cdot 7,5 = 12 \text{ см};$$

$$D_3 = D_2 = 1 \text{ см}; \quad D_3 = 8,5 \text{ см}; \quad d_{13} = 1,75 \text{ см.}$$

### 4. Длина индуктора

$$a_1 = 4 \cdot 16,6 + 12 = 78,4 \text{ см.}$$

### 5. Тепловые потери

$$\Delta P_T = 37,4 \cdot 10^{-2} \cdot 78,4 / \lg (12/8,5) = 19 \text{ кВт.}$$

### 6. Средняя мощность в заготовке

$$P_{\text{ср}} = 1,05 (190 + 19) = 219 \text{ кВт.}$$

7. Активное и внутреннее реактивное сопротивления заготовки:

$$m_2 = 4,73; \quad A = 0,25; \quad B = 0,3;$$

$$r_2 = \pi 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 4,73^2 \cdot 0,25/66,4 = 3,28 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_{2M} = \pi 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 4,73^2 \cdot 0,3/66,4 = 3,94 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

### 8. Реактивность рассеяния индуктора

$$x_S = 7,9 \cdot 10^{-8} \cdot 2500\pi (12^2 - 7,5^2)/(4 \cdot 66,4) = 20,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

9. Коэффициент приведения активного сопротивления заготовки

$$x_{10} = 7,9 \cdot 10^{-8} \cdot 2500\pi \cdot 12^2 / (4 \cdot 78,4) = 28,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

по формуле (45):  $k = f(12/78,4) = 0,94$ ;

$$x_0 = 0,94 \cdot 78,4 \cdot 28,5 \cdot 10^{-5} / (78,4 - 0,94 \cdot 66,4) = 130 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$C = \frac{1}{(3,28/130)^2 + (1 + 24,44/130)^2} = 0,71.$$

10. Приведенное активное и реактивное сопротивления заготовки:

$$r'_2 = 0,71 \cdot 3,28 \cdot 10^{-5} = 2,33 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x'_2 = 0,71 [24,44 + (24,44^2 + 3,28^2)/130] 10^{-5} = 20,6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

11. Активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктора

$$r_1 \approx x_{1M} \approx \pi 12 \cdot 2 \cdot 10^{-6} / (78,4 \cdot 0,85 \cdot 0,14) = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

12. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_H = 0,81 \cdot 10^{-5} + 2,33 \cdot 10^{-5} = 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_H = 0,81 \cdot 10^{-5} + 20,6 \cdot 10^{-5} = 21,41 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$z_H = \sqrt{21,41^2 + 3,14^2} \cdot 10^{-5} = 21,64 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

13. Электрический к. п. д. индуктора

$$\eta_3 = 2,33/3,14 = 0,743.$$

14. Мощность, подводимая к индуктору,

$$P_H = 219/0,743 = 295 \text{ кВт}.$$

15. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_H = 3,14/21,64 = 0,145.$$

16. Ток в одновитковом индукторе

$$I'_H = \sqrt{219 \cdot 10^3 / (2,33 \cdot 10^{-5})} = 9,7 \cdot 10^4 \text{ А.}$$

17. Напряжение на одновитковом индукторе

$$U'_H = 9,7 \cdot 10^4 \cdot 2,164 \cdot 10^{-4} = 21 \text{ В.}$$

18. Число витков индуктора

$$w = 750/21 \approx 36.$$

19. Удельная мощность потерь

$$\Delta \rho_T = (P_{2cp} - P_T) / (\pi D_2 a_2) = (219 - 190) / (\pi 7,5 \cdot 66,4) = \\ = 0,0185 \text{ кВт/см}^2.$$

20. Распределение удельной мощности по участкам: по формулам (49)

$$\begin{aligned}p_{01} &= 1,87/6,38 = 0,294 \text{ кВт/см}^2; \\p_{02} &= 0,417/6,38 = 0,0655 \text{ кВт/см}^2; \\p_{03} &= 0,122/6,38 = 0,0192 \text{ кВт/см}^2.\end{aligned}$$

Полные удельные мощности по участкам:

$$\begin{aligned}p_1 &= p_{01} + \Delta p_T = 0,294 + 0,0185 \approx 0,313 \text{ кВт/см}^2; \\p_2 &= 0,0655 + 0,0185 = 0,084 \text{ кВт/см}^2; \\p_3 &= 0,0192 + 0,0185 \approx 0,038 \text{ кВт/см}^2.\end{aligned}$$

21. Разбивка индуктора по участкам: по формулам (48)

$$\begin{aligned}a_{21} &= 0,27a_2 = 0,27 \cdot 66,4 = 17,9 \text{ см}; \\a_{22} &= 0,23a_2 = 0,23 \cdot 66,4 = 15,3 \text{ см}; \\a_{23} &= 0,5a_2 = 0,5 \cdot 66,4 = 33,2 \text{ см}.\end{aligned}$$

Проверка соответствия суммарной мощности по участкам средней мощности:

$$\begin{aligned}P_{21} &= \pi D_2 a_{21} p_1 = \pi 7,5 \cdot 17,9 \cdot 0,313 = 132 \text{ кВт}; \\P_{22} &= \pi D_2 a_{22} p_2 = \pi 7,5 \cdot 15,3 \cdot 0,084 = 30,3 \text{ кВт}; \\P_{23} &= \pi D_2 a_{23} p_3 = \pi 7,5 \cdot 33,2 \cdot 0,038 = 29,7 \text{ кВт}; \\P_{2\text{ср}} &= P_{21} + P_{22} + P_{23} = 132 + 30,3 + 29,7 = 192 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

Следует изменить разбивку, так как получение значение средней мощности меньше рассчитанного раньше.

Принимаем

$$a_{21} = 0,31a_2; \quad a_{22} = 0,28a_2; \quad a_{23} = 0,41a_2;$$

имеем

$$a_{21} = 20,6 \text{ см}; \quad a_{22} = 18,6 \text{ см}; \quad a_{23} = 27,2 \text{ см};$$

$$P_{21} = 152 \text{ кВт}; \quad P_{22} = 37 \text{ кВт}; \quad P_{23} = 24,3 \text{ кВт};$$

$P_{2\text{ср}} = 213,3 \text{ кВт}$ , что близко к полученному в п. 6 значению  $P_{2\text{ср}} = 219 \text{ кВт}$ .

$$\begin{aligned}a_{11} &= 20,6 + 6 = 26,6 \text{ см}; \quad a_{12} = a_{22} = 18,6 \text{ см}; \\a_{13} &= 27,2 + 6 = 33,2 \text{ см}.\end{aligned}$$

22. Распределение витков по участкам: согласно формулам (50)

$$\alpha = \sqrt{p_1/p_3} = \sqrt{0,313/0,038} = 2,87;$$

$$\beta = \sqrt{p_2/p_3} = \sqrt{0,084/0,038} = 1,487;$$

по формуле (52)

$$w'_3 = 36 / (33,2 + 1,487 \cdot 18,6 + 2,87 \cdot 26,6) = 0,264 \text{ витка/см};$$

$$w'_2 = \beta w'_3 = 1,487 \cdot 0,264 = 0,392 \text{ витка/см};$$

$$w'_1 = \alpha w'_3 = 2,87 \cdot 0,264 = 0,757 \text{ витка/см};$$

$$w_1 = w'_1 a_{11} = 0,757 \cdot 26,6 = 20 \text{ витков};$$

$$w_2 = w'_2 a_{12} = 0,392 \cdot 18,6 = 7 \text{ витков};$$

$$w_3 = w'_3 a_{13} = 0,264 \cdot 33,2 = 9 \text{ витков}.$$

Дальше производится выбор размеров трубы для каждого участка, проверки максимальной плотности тока в проводе участка и расчет охлаждения. В рассматриваемом случае плотность тока в проводе первого участка  $\delta_1 = 156 \text{ А/мм}^2$ , что находится на границе допустимой.

Сравнение двух последних примеров показывает, что во втором случае индуктор при меньшей длине имеет вдвое большую производительность, чем в первом. Однако повышенная плотность тока в проводе первой секции делает в ряде случаев невозможной полную реализацию высокой производительности, характеризующей рассмотренный способ нагрева.

#### 14. ОВАЛЬНЫЕ И ЩЕЛЕВЫЕ ИНДУКТОРЫ

Индукторы для нагрева пластин и лент. Овальные индукторы для нагрева заготовок с вытянутым прямоугольным поперечным сечением имеют две направляющие и футеровку, подобную показанной на рис. 34. Расчет индукторов для нагрева до  $1200$ — $1300^\circ\text{C}$  производится, как указано в п. 13. Также могут быть осуществлены индукторы с переменным шагом витков.

Более сложным является нагрев стальных лент до температур ниже точки магнитных превращений. В этом случае необходимо учитывать, что магнитная проницаемость ленты зависит, косвенным образом, через напряженность магнитного поля — от удельной мощности, что, с одной стороны, осложняет расчет и, с другой — расширяет возможности в выборе частоты тока. С уменьшением удельной мощности, что достигается удлинением индуктора (увеличением шага витков), при неизменном числе витков уменьшается и напряженность магнитного поля. При этом возрастает магнитная проницаемость и уменьшается глубина проникновения тока, в результате чего может быть применена более низкая частота. Индукторы для нагрева ленты выполняются без направляющих.

Индукторы для нагрева концов заготовок. Овальные и щелевые индукторы для нагрева концов заготовок не имеют направляющих, так как заготовки лежат на тех или иных транспортирующих устройствах. Обычно в таких индукторах нагреваются

цилиндрические заготовки. Индуктор работает по принципу индуктора методического действия, но заготовки передвигаются по перек индуктора: с одного бока загружаются холодные и с другого извлекаются нагретые (рис. 41). Более подробно конструкции описаны в [8].

Расчет индуктора подобен описанному выше расчету индуктора методического действия с равномерным шагом витков, но имеет следующие особенности.

#### 1. Выбор ширины щели индуктора

$$b_1 = nD_2 + \Delta b,$$

где  $n = t_k/t_0$  — число заготовок в индукторе;  $D_2$  — диаметр заготовки;  $\Delta b$  — выбирается из конструктивных соображений. В этот размер также включается толщина тепловой изоляции (см. п. 12).

#### 2. Активное сопротивление заготовок

$$r_2 = 1,6\pi r_{2n},$$

где  $r_{2n}$  — активное сопротивление одной заготовки, вычисляется по формуле (39).

В этом случае длиной заготовки  $a_2$  считается длина конца, вдавнутого в индуктор.

При нагреве до  $1200-1300$  °C удельное сопротивление  $\rho_2 = 1,24 \cdot 10^{-4}$  Ом·см и  $\Delta_2 = \Delta_k$ .

#### 3. Внутреннее реактивное сопротивление заготовок

$$x_{2m} = 1,15\pi x_{2ml},$$

где  $x_{2ml}$  — внутреннее реактивное сопротивление одной заготовки, вычисляется по формуле (40).

#### 4. Реактивное сопротивление рассеяния

$$S_h = S_1 - n\pi D_2^2/4,$$

где  $S_1$  — площадь щели между индуктирующими проводами, см<sup>2</sup>. Расчет ведется по формуле (41).

Довольно часто применяются индукторы щелевого типа (рис. 42). Действуют они подобно овальному индукторам. Основное достоинство щелевых индукторов заключается в простоте загрузочного и разгрузочного устройства, так как заготовки прямо проходят через индуктор и поэтому не требуется установки толкателей или захватов. Расчет индуктора производится так же, как и овального, но при определении реактивности рассеяния  $x_3$  и  $x_0$  индуктор распрямляется по средней линии (рис. 42) так, что получается широкий овальный индуктор. Коэффициент полезного действия щелевых индукторов несколько ниже, чем овальных, вследствие потерь в отогнутых лобовых частях, поэтому их

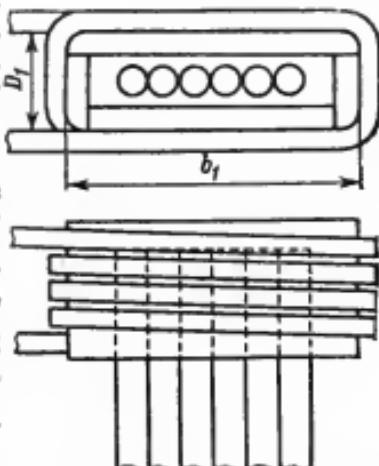


Рис. 41. Овальный индуктор для нагрева цилиндрических заготовок

следует применять в тех случаях, когда суммарная длина обеих лобовых частей составляет менее 0,3 от длины щели<sup>1</sup>.

Разновидностью описанных выше индукторов является индуктор для установки роторного типа, состоящий из двух спиралей, помещенных одна в другую. Спирали соединяются так, что-

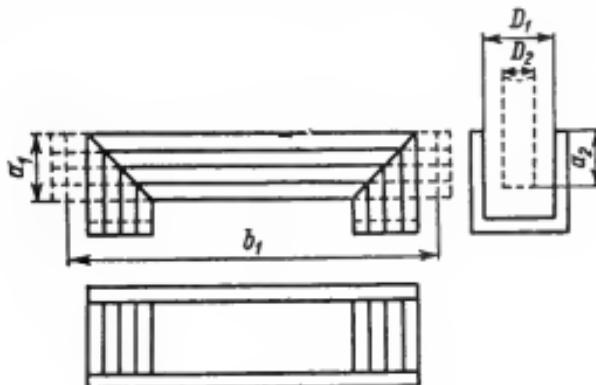


Рис. 42. Щелевой индуктор

бы в промежутке между ними, куда помещаются нагреваемые объекты, магнитные поля их складывались.

Для расчета индуктор распрямляется по среднему диаметру.

## 15. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ТОНКОГО МАТЕРИАЛА В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Листовой материал, толщина которого меньше глубины проникновения тока, можно нагревать при очень высоком к. п. д. индуктором, схематически изображенным на рис. 43. Часть индуктора, содержащая индуктирующий провод, выполнена подобно описанному выше (см. рис. 20 и 25) плоскому индуктору. Магнитное поле индуктора замыкается через нижний магнитопровод, пронизывая нагреваемый лист. Индуктированный ток сконцентрирован под пазом магнитопровода и замыкается по обе стороны от индуктора (см. рис. 19). Вариант индуктора, в котором индуктирующие провода с токами одного направления расположены по обе стороны листа, приведен на том же рисунке. По принципу действия система индуктор — нагреваемый лист сходна с трансформатором, имеющим дисковые обмотки. Индуктор может иметь электрический к. п. д. около 90—94% даже при нагреве материалов с малым удельным сопротивлением таких, как медь.

При нагреве листового материала чаще применяются индукторы подобного типа, изображенные на рис. 44. В этом случае как прямая, так и обратная ветви индуктированного тока, сконцентрированные под проводами, вызывают интенсивный нагрев.

<sup>1</sup> См. Библиотечку, вып. 8, а также [8].

Основной трудностью в применении подобных индукторов для нагрева листов по всей ширине является достижение равномерной температуры по ширине листа. Изменением длины магнитопровода обычно не удается получить колебание температуры

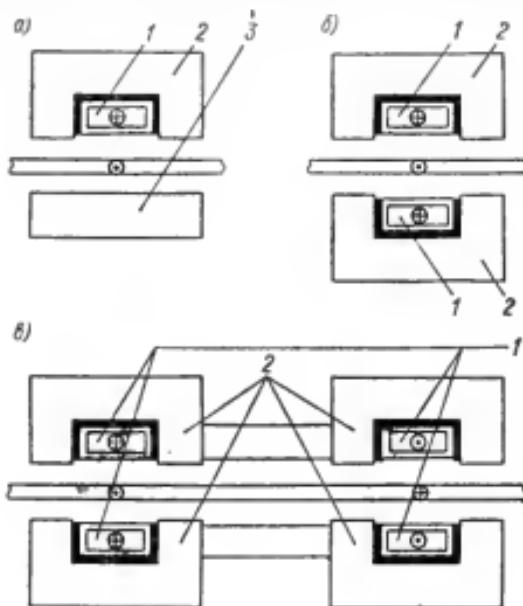


Рис. 43. Простейшие индукторы для нагрева в поперечном магнитном поле:  
 а — для нагрева листа с одним индуктирующим проводом; б — с двумя индуктирующими проводами для нагрева листа и кромок листов; в — наиболее распространенный тип индуктора для нагрева движущейся ленты:  
 1 — индуктирующий провод; 2 — основной магнитопровод; 3 — дополнительный магнитопровод

меньше  $\pm 10 \dots 15\%$  от температуры в средней части листа, что не всегда удовлетворяет поставленным требованиям.

Некоторых результатов в этом направлении можно достигнуть, увеличивая зазор между индуктором и лентой к краям последней. По-видимому, наилучшие результаты дает уменьшение расстояния между проводами к краям ленты (рис. 44)<sup>1</sup>. К сожалению, не представляется возможным дать точные количественные рекомендации в этом направлении. Окончательно конструкция индуктора подбирается опытным путем.

Если требуется высокая производительность и, следовательно, большая мощность, то устанавливается несколько индукторов

<sup>1</sup> Подробнее см. [5].

один за другим. Этим достигается уменьшение нагрузки индуктора и повышение надежности его работы.

## 16. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ТОРЦОВ ПРУТНОВ

При стыковой сварке давлением ставится задача равномерного прогрева свариваемых поверхностей за возможно короткий промежуток времени с тем, чтобы глубина зоны про-

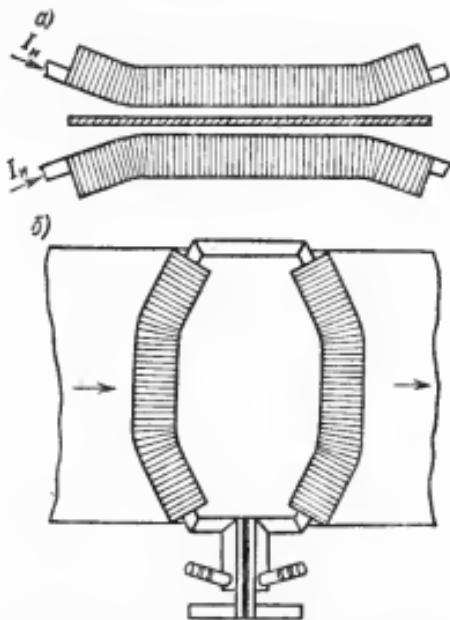


Рис. 44. Варианты индукторов для нагрева листов в поперечном магнитном поле, выполненные по типу рис. 43, *в*: *а* — с переменным зазором для выравнивания нагрева; *б* — с переменным шагом

грева в осевом направлении была минимальной. Для этой цели непрнгоден обычный индуктор, охватывающий стык снаружи, так как внутри тепло будет распространяться в значительной степени за счет теплопроводности. Например, нагрев прутка диаметром 50—60 мм до 1400—1450 °С с перепадом температуры между поверхностью и центром в пределах 20—30 °С продолжается несколько минут, что ведет к прогреву до пластичного состояния значительного участка в осевом направлении. В результате этого оказывается невозможно приложить давление, необходимое для осуществления высококачественной сварки.

Если, однако, выполнить индуктор в виде двух замкнутых колец, каждое из которых охватывает конец одного из стержней,

соединив середины обоих колец перемычкой с одной стороны и расположив с противоположной стороны токоподводы, то индуцированный ток будет проходить именно по торцам, обеспечивая их быстрый нагрев (рис. 45). Так как токи, проходящие по обо-

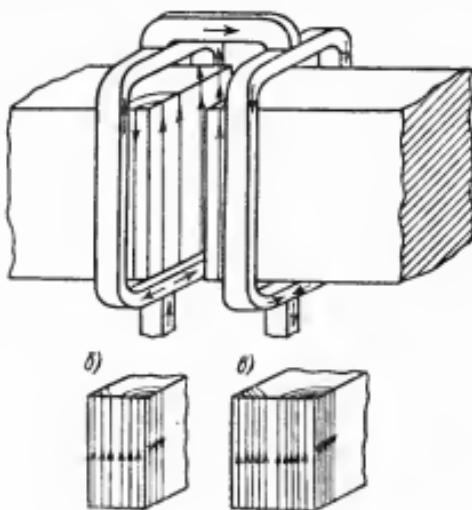


Рис. 45. Индуктор для нагрева торцов деталей со сплошным сечением под сварку: *а* — индуктор; *б* — распределение индуцированного тока в детали при ширине торца в поперечном направлении менее 70 мм; *в* — то же, но при ширине торца в поперечном направлении больше 70 мм

им торцам, направлены противоположно друг другу, то эффект близости будет способствовать их концентрации [1].

Таким индуктором можно успешно нагревать торцы прутков квадратного или прямоугольного сечения, а также цилиндрические. Однако сторона квадрата или диаметр цилиндра не должны превышать 70—80 мм. При больших размерах ток на торце разделяется на две ветви и средняя часть нагревается недостаточно (рис. 45).

Обычно зазор между торцами составляет 1—2 мм и между ними возникают перемежающиеся электрические дуги, вызывающие поверхностное их оплавление, что способствует стабильности сварки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глуханов Н. П., Богданов В. Н. Сварка металлов при высокочастотном нагреве. М.; Л., 1962.
2. Демичев А. Д., Сергеева К. И., Якубович И. И. Закалка шестерен среднего модуля. — В кн.: Промышленное применение токов высокой частоты в электротермии. М.; Л., 1961, кн. 53.
3. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М., 1958.
4. Пейсахович В. А. Расчет сопротивления заготовок квадратного и прямоугольного сечений при индукционном нагреве. Промышленное применение токов высокой частоты. — Тр. НИИТВЧ, 1961, вып. 3.
5. Пейсахович В. А. К вопросу о равномерии нагреве движущейся металлической ленты в поперечном магнитном поле. — В кн.: Промышленное применение токов высокой частоты в электротермии. М.; Л., 1961, кн. 53.
6. Родигин Н. М. Индукционный нагрев стальных изделий. М.; Свердловск, 1950.
7. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л., 1974.
8. Шамов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л., 1974.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
I. Индукторы для закалки внешних цилиндрических поверхностей . . . . .	4
1. Общие сведения . . . . .	—
2. Индукторы для закалки на средних частотах . . . . .	8
3. Индукторы для закалки на радиочастотах . . . . .	14
4. Индукторы с приспособлениями для установки деталей . . . . .	—
5. Приближенный расчет цилиндрических индукторов . . . . .	15
II. Индукторы для закалки внутренних цилиндрических и плоских поверхностей . . . . .	25
6. Индукторы для закалки внутренних поверхностей . . . . .	—
7. Индукторы для закалки плоских поверхностей . . . . .	30
III. Основные типы индукторов для закалки поверхностей сложной формы . . . . .	38
8. Индукторы для закалки тел вращения . . . . .	—
9. Индукторы для закалки торцовых поверхностей . . . . .	40
10. Индукторы для закалки шестерен большого модуля . . . . .	—
11. Электромагнитное экранирование . . . . .	43
IV. Индукторы для сквозного нагрева . . . . .	44
12. Индукторы для нагрева мерных заготовок . . . . .	—
13. Расчет индукторов для нагрева мерных заготовок . . . . .	52
14. Овальные и щелевые индукторы . . . . .	66
15. Индукторы для нагрева тонкого материала в поперечном магнитном поле . . . . .	68
16. Индукторы для нагрева торцов прутков . . . . .	70
Список литературы . . . . .	72

25 коп.



• МАШИНОСТРОЕНИЕ •